

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechaniky

**Simulace propadů střechy automobilu a návrh změn vedoucích ke  
zvýšení odolnosti střechy**

Buckling simulation of the car's roof

Student: Bc. Jan Prax

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Petr Horyl, CSc.

Ostrava 2010

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra mechaniky

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Prax**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 3901T003 Aplikovaná mechanika  
Téma: Simulace propadů střechy automobilu a návrh změn vedoucích ke zvýšení odolnosti střechy  
Buckling Simulation of the Car's Roof

Zásady pro vypracování:

1. Uvedení do problematiky: proces lakování a vypalování laku vozu, výsledky dosavadních měření rozložení teplot na střeše a souvisejících dílech vozu při procesu vypalování, další vlivy působící na technologický proces - rychlost náběhu teplot, tolerance, vlastnosti materiálů aj.
2. Torie elastické a plně nelineární ztráty stability tvaru
3. Ztráta stability tvaru aplikovaná na problém propadů střechy automobilu - výpočet lineární elastické a materiálově nelineární úlohy, srovnání výsledků
4. Srovnání výsledků simulace s chováním reálného automobilu
5. Návrh a výpočet variant řešení vedoucí k odstranění propadů na střeše s ohledem na potřebu minimálních změn designu a technologických parametrů
6. Zhodnocení a závěry

Seznam doporučené odborné literatury:

1. ANSYS® ANSYS Academic Research, Release 12.0, Help System
2. <http://www.ansys.net>
3. dokumentace zadavatele

Externí konzultant: Ing. Jiří Škoda

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Petr Horyl, CSc.**

Datum zadání: 18.12. 2009

Datum odevzdání: 21. 5. 2010

  
doc. Ing. Jiří Podešva, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....

.....  
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé kvalifikační práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :.....

.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Jan Prax

Adresa trvalého pobytu autora práce: Trávník 1993, Česká Třebová, 56002

#### ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

PRAX, J. *Simulace propadů střechy automobilu a návrh změn vedoucích ke zvýšení odolnosti střechy : diplomová práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava. Fakulta strojní, katedra mechaniky, 2010, 68 s. Vedoucí práce: Horyl, P.

Diplomová práce se zabývá řešením problému ztráty stability na střeše automobilu Škoda Fabia II, která byla způsobena teplotním namáháním v sušící lince po nanášení nátěrů a laků na automobil. V úvodu je popsán samotný proces lakování a měření teplotních polí na střeše automobilu. Dále jsou popsány metody, sloužící k lineárním i nelineárním výpočtům ztráty stability tvaru. Následně je popsán výpočet ztráty stability tvaru v lineární i nelineární oblasti. Předposlední kapitola se věnuje návrhům, které zvyšují odolnost střechy proti teplotnímu namáhání. Tyto návrhy jsou doplněny o výsledky lineárního i nelineárního výpočtu.

#### ANNOTATION OF MASTER THESIS

PRAX, J. *Buckling simulation of the car's roof : Master Thesis*. Ostrava : VŠB –Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanics , 2010, 68 p. Thesis head: Horyl, P.

The diploma thesis deals with the problem of loss of stability on the roof of the car Škoda Fabia II which was caused by temperature stress in the drying line after the paints and lacquers were put onto the car. The process of lacquering and measuring temperature fields are described in the beginning of the thesis. Methods for both linear and nonlinear calculations of loss of shape stability are also described. The calculation of loss of shape stability is then described both in linear and nonlinear area. The next to the last chapter is devoted to the proposals which increase the resistance of the roof to temperature stress. These proposals are supplied by results both of linear and nonlinear calculations.

Dovoluji si touto cestou poděkovat panu prof. Ing. Petru Horylovi, CSc. za vzornou a obětavou pomoc při řešení mé diplomové práce a za jeho cenné připomínky, které vedly ke zkvalitnění mé práce.

Jan Prax

## Obsah

Seznam použitého označení.....	- 9 -
1. Úvod.....	- 10 -
2. Proces lakování.....	- 12 -
2.1 Rozložení teplot na střeše automobilu .....	- 13 -
3. Teorie ztráty stability.....	- 17 -
3.1 Elastická ztráta stability .....	- 18 -
3.2 Nelineární ztráta stability tvaru .....	- 19 -
4. MKP.....	- 23 -
4.1 Popis modelu.....	- 23 -
4.2 Typy elementů.....	- 25 -
4.3 Okrajové podmínky.....	- 26 -
4.4 Materiálové modely .....	- 28 -
4.5 Import modelu .....	- 31 -
4. Lineární výpočet.....	- 33 -
5.1 Lineární výpočet v programu ANSYS .....	- 33 -
5.2 Srovnání výsledků lineárních výpočtů ANSYS – NASTRAN.....	- 35 -
5. Nelineární výpočet.....	- 37 -
6.1 Nelineární výpočet v programu ANSYS.....	- 37 -
6.2 Výsledky nelineárního výpočtu.....	- 39 -
6.3 Srovnání výsledků lineárních výpočtů ANSYS – NASTRAN.....	- 41 -
7. Srovnání výsledků simulace s chováním reálného automobilu.....	- 43 -
8. Návrhy na zvýšení odolnosti střechy .....	- 45 -
8.1 První návrh – střecha z plechu o větší tloušťce.....	- 45 -
8.1.1 Lineární výpočet prvního návrhu .....	- 46 -
8.1.2 Nelineární výpočet prvního návrhu .....	- 47 -
8.2 Druhý návrh – tloušťka střechy zvýšena jen na okraji.....	- 48 -

8.2.1 Lineární výpočet druhého návrhu .....	- 49 -
8.2.2 Nelineární výpočet druhého návrhu .....	- 50 -
8.3 Třetí návrh – prolis v plechu .....	- 52 -
8.3.1 Lineární výpočet třetího návrhu .....	- 53 -
8.3.2 Nelineární výpočet třetího návrhu .....	- 54 -
8.4 Čtvrtý návrh – výztuhy pod střechou .....	- 55 -
8.4.1 Lineární výpočet čtvrtého návrhu .....	- 56 -
8.4.2 Nelineární výpočet čtvrtého návrhu .....	- 57 -
8.5 Pátý návrh – přilepené pásy plechu .....	- 58 -
8.5.1 Lineární výpočet pátého návrhu .....	- 59 -
8.5.2 Nelineární výpočet pátého návrhu .....	- 61 -
8.6 Zhodnocení návrhů .....	- 63 -
9. Závěr .....	64
10. Použitá literatura .....	66
Přílohy .....	67
Příloha A .....	67
Příloha B .....	68
Příloha C .....	- 70 -



## Seznam použitého označení

Označení	Název	Jednotky
$F$	vnitřní uzlové síly	
$K$	matice tuhosti celého systému	
$K_{\sigma}$	matice geometrické tuhosti (matice tuhosti vyvolaná počátečním předpětím)	
$K_{(\{R\})}$	matice tuhosti závislá na zatížení	
$K_t$	tečná matice tuhosti	
$R$	vektor zobecněných deformačních parametrů	
$\{R\}$	vektor zatížení	
$\Delta R$	přírůstek zatížení	
$T_{CL}$	kritická teplota pro lineární výpočet	[°C]
$T_{CN}$	kritická teplota pro nelineární výpočet	[°C]
$a$	kvadrát nevyrovnané délky oblouku	
$\Delta l$	poloměr kulové plochy v prostoru $(\lambda, r)$	
$\Delta r$	přírůstek posuvu	
$\lambda_i$	vlastní číslo	
$\lambda$	parametr určující hladinu zatížení	
$\psi$	skalární parametr vyjadřující poměr zvolených měřítek pro $\lambda$ a $r$	

## 1. Úvod

Výběr tématu diplomové práce není lehké rozhodnutí. Musíte si při tom uvědomit, že při řešení práce strávíte mnoho dní a nocí jak při samotném psaní, počítání a jiných činnostech, tak také v období řešení práce vlastně nemáte nic jiného v hlavě a veškeré myšlenky směřují jen k jednomu tématu. Není proto radno brát takové rozhodnutí na lehkou váhu a je lepší si ho dobře rozmyslet. Já si velmi dlouho procházel vypsána témata diplomových prací, a i když jsem byl rozhodnutý celkem brzy, nechal jsem si nějaký čas na to, abych si vše dobře promyslel a nic neuspěchal. Nakonec jsem se rozhodl, zašel jsem za vedoucím vybraného tématu, abych si zjistil veškeré detaily a ujasnil si, co mě čeká. Téma, které jsem si vybral, bylo vypsáno firmou ŠKODA AUTO a.s., a proto bylo nutné kontaktovat oprávněné lidi z této firmy, zda je téma stále k dispozici. V první fázi bylo nutné udělat v oficiálním zadání od firmy několik změn, protože jsme na VŠB-TUO nedisponovali takovým softwarem, jaký používají oni. Po těchto procedurách bylo možné se pomalu pustit do práce.

K tomuto tématu mě přitahovalo hned několik faktorů. První byl určitě ten, že téma úzce souvisí s automobilovým průmyslem, který mě asi ze všech odvětví strojírenství už snad od narození zajímá nejvíce. Určitě je lepší psát diplomovou práci na téma, které autorovi nějakým způsobem blízké. Dalším faktorem pro mě bylo, že téma bylo vypsáno firmou ŠKODA AUTO a.s., jejíž produkty jsou dobře známé a velmi oblíbené. Pro mě to byla svým způsobem i určitá výzva a zodpovědnost psát pro takto velkou firmu. Velmi mě, ale lákalo poznat takovou firmu z trošku jiného pohledu, než je to umožněno ostatním lidem.

Automobilový průmysl je velmi rychle se rozvíjející odvětví průmyslové výroby. Díky vysoké konkurenci a velké rozmanitosti tohoto průmyslu je velmi důležité klást velké nároky na kvalitu výroby. Automobilka ŠKODA AUTO a.s. věnuje velkou pozornost tomu, aby jejich automobily byly v provozu bezpečné a také, aby v tomto provozu vydržely co nejdéle. To ovlivňuje mnoho faktorů, na které se musí brát ohledy při výrobě a návrhu nového automobilu. Mezi tyto faktory patří např. kvalita výroby, vhodná volba materiálů na použité komponenty a také ochrana těchto materiálů proti vlivům, působících na ně v provozu. Jedná se hlavně o ochranu kovových dílů karosérie, rámu vozu a

podvozku, proti korozi. Tato ochrana se provádí nanášením různých vrstev ochranných nátěrů, laků a jiných ochranných hmot a to i v několika vrstvách.

Právě při procesu lakování došlo v oblasti střechy automobilu k problému, který je nazýván jako ztráta stability tvaru, tzn., že dochází k nečekaným změnám tvaru, které jsou nevratné a pro konečný výrobek, který má být dodán zákazníkovi, neakceptovatelné. Tyto změny tvaru jsou způsobené teplotním zatížením, kterému je karoserie automobilu vystavena při vysoušení jednotlivých nátěrových hmot. Tato diplomová práce má za úkol řešit tento problém pomocí numerických metod. Hlavním cílem je navržení změn, které by vedly ke zlepšení daného problému.



Obrázek 1 - Škoda Fabia II

Práce je rozdělena do několika hlavních kapitol, které popisují jak samotný proces lakování na skutečném voze, tak výpočty a výpočtové metody prováděné na tzv. MKP modelu automobilu. Jedna z posledních kapitol je věnována provedeným úpravám, jejichž cílem je zvýšit odolnost střechy automobilu.

## 2. Proces lakování

Při lakování vozu, nejde jen o nanesení barevného odstínu na díly auta a jeho vzhled. Je to velmi složitý a sofistikovaný proces, který se neustále vyvíjí a zdokonaluje. Při tomto procesu je hlavním cílem, dosáhnout co nejvyšší odolnosti karoserie proti korozi. Díky tomu pak může výrobce na své automobily poskytovat delší záruční doby, což je pro koncového zákazníka velmi důležitý faktor.

Plech, které se používají na výrobu karoserie, jsou pozinkované. Takto upravené plechy jsou už samy o sobě dobře chráněny proti korozi. Na tyto plechy je nanášen pětivrstvý nátěrový systém, který je složen z: trikationtového fosfátu, kataforetického základování, plniče, pigmentového základu a vrchního bezbarvého laku. Před nanesením první vrstvy tohoto nátěrového systému je celá karoserie dokonale očištěna a odmaštěna. První vrstva je nanášena ponorem celé karoserie do lázně. Tím je zajištěno pokrytí všech částí a dutin karoserie. Další vrstvou je základová barva, která se nanáší taktéž ponorem do lázně. Tato vrstva má velmi dobré antikoroziční účinky a zajišťuje dobré přilnutí dalšího nátěru. Po nanesení základové vrstvy je karoserie zahřátá na teplotu 180 °C, aby byla vrstva dostatečně vytvrzena. Před nanášením plniče je na karoserii nanesena utěšňovací hmota a to buď ve formě housenek, nebo pásových nátěrů. Tento nátěr dobře odolává různým kyselinám a mechanickému poškození. Další a tedy třetí vrstvou nanášenou na karosérii je tzv. plnič. Ten je nanášen ve třech různých odstínech, v závislosti na barvě konečného laku. Plnič je nanášen v elektrostatickém poli, kde jsou nabitě částičky barvy přitahovány ke karoserii. Plnič se opět vypaluje a to při teplotě 165 °C. Na tuto pigmentovou vrstvu se již nanáší vrstva laku s konečným barevným odstínem karoserie. Úplně poslední vrstvou je bezbarvý lak, který zajišťuje konečný lesk karoserie. Tento lak je nanášen při teplotě 70 °C a nakonec se vypaluje za teploty 140 °C. Kompletní ochranu karoserie proti korozi doplňuje ještě konzervace vnitřních dutin. Ta se provádí vstříknutím přesně daného množství speciálního vosku pod tlakem do dutin.

Jak již bylo výše zmíněno, nanesené vrstvy barev a ochranných nátěrů se musí v určitých fázích po nanesení vypálit. Toto vypalování samozřejmě probíhá za vyšších teplot, než kterým je automobil normálně v provozu vystaven. Vypálení nátěrů za vyšších teplot zajišťuje, že jednotlivé vrstvy budou dostatečně odolné. Při procesu vypalování je celá karosérie zahřívána na teploty až 180 °C.

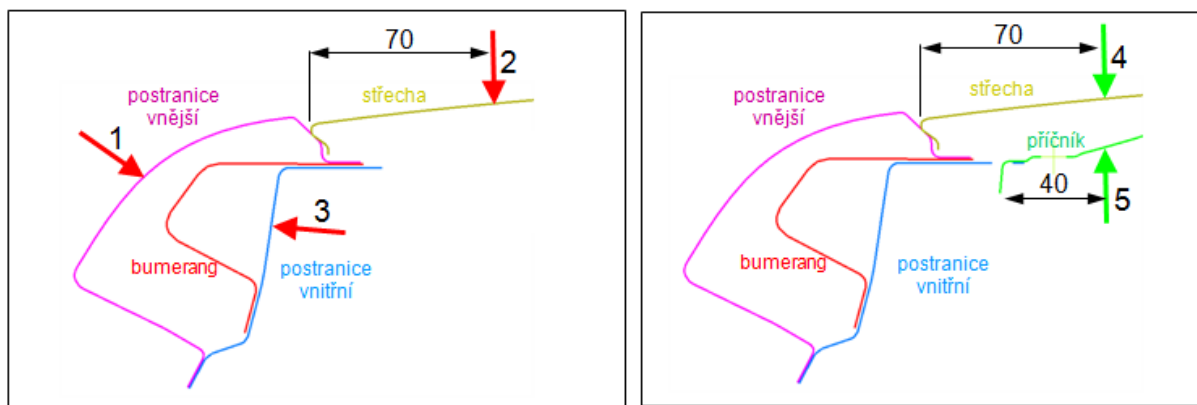
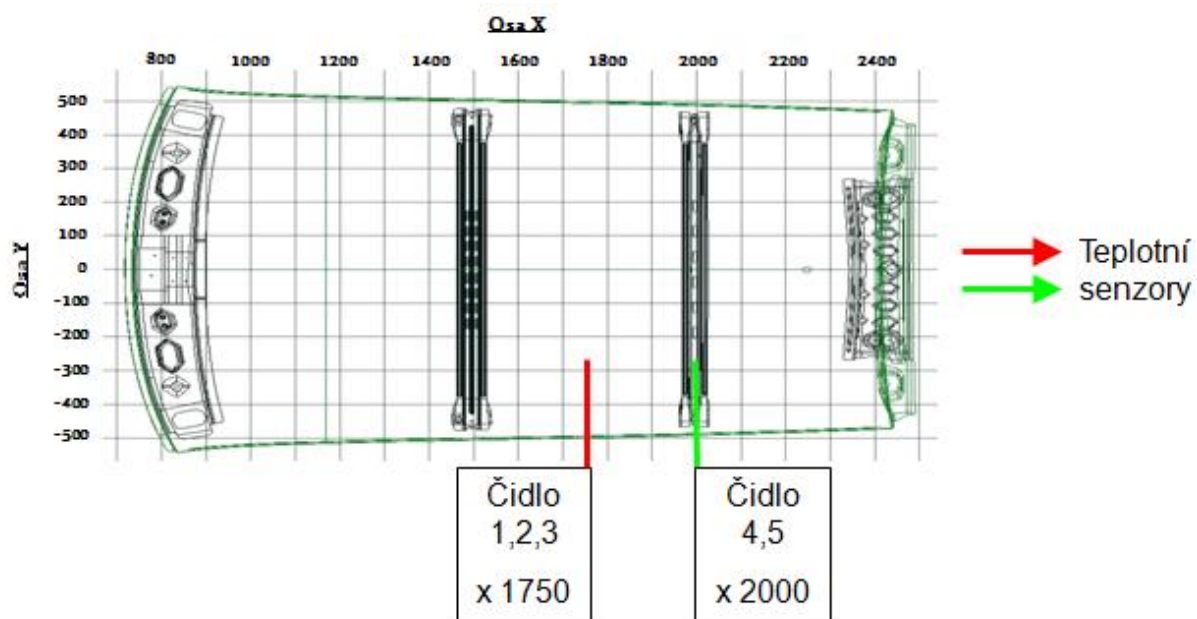
## 2.1 Rozložení teplot na střeše automobilu

Zahřívání karoserie se provádí proudem ohřátého vzduchu. Je jasné, že tento proud vzduchu se nedostane ke všem částem automobilu ve stejný okamžik a o stejné okamžité teplotě. Mnoho částí, které zajišťují konečnou pevnost celé karoserie, nejsou z venčí ani viditelné, a jsou tedy ohřívány nepřímo vedením tepla z jiné součásti. Karoserie vozu je tvořena různými materiály, o různých vlastnostech a různých tloušťkách. V případě pouze tepelného zatěžování karoserie má dominantní vliv tepelná roztažnost materiálu, která způsobuje rozpínání materiálu v případě jeho zahřívání.

Z výše uvedených důvodů se každá část prohřívá a chladne jinou rychlostí. To samozřejmě ovlivňuje deformace, ke které by došlo, pokud by součást nebyla nijak omezována. Veškeré tyto části jsou spolu ovšem pevně spojeny a vzájemně na sebe působí. Z tohoto důvodu vzniká v karoserii napjatost. Tomuto stavu, se při výrobě automobilu nelze vyhnout, ovšem musí být zajištěno, že tyto deformace nezpůsobí trvalé poškození automobilu.

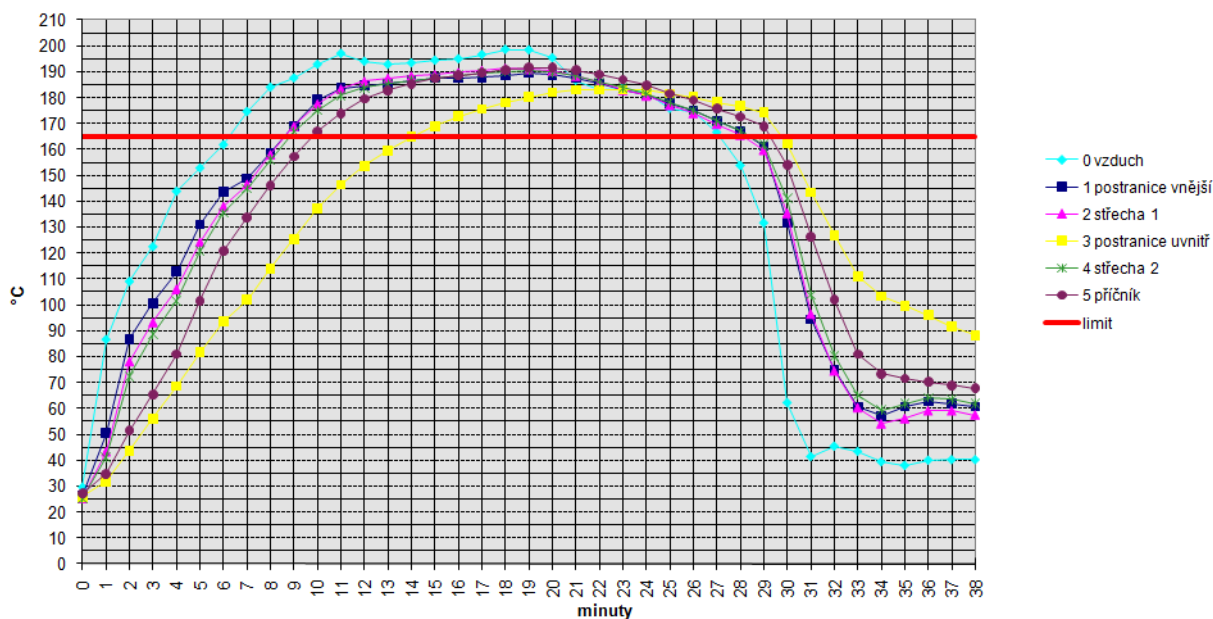
Charakteristickou vlastností ocelových materiálů je tzv. mez kluzu. Ta označuje maximální hodnotu napětí, která ještě nezpůsobí trvalé deformace. Pokud napjatost vzniklá v součástech automobilu přesáhne mez kluzu materiálu, dojde ke vzniku plastické deformace. Tato deformace způsobí, že i po vychladnutí zůstane materiál zdeformovaný a součást je tedy zatížena odchylkou od svého původního tvaru. Takto zdeformovaná karoserie nemůže pokračovat k dalšímu procesu ve výrobě. Právě k tomuto stavu došlo v určité vývojové etapě na určitých místech střechy automobilu Škoda Fabia II. Po průchodu lakovnou vznikly v pohledovém plechu střechy prohlubně, které jsou pro konečný výrobek nepřijatelné. Nový majitel vozu by tyto prohlubně okem laika nemusel vůbec zpozorovat, ovšem výstupní kontrola klade tak vysoké nároky, že se vozidlo s takovou chybou vůbec nedostane do prodeje. Na sériově vyráběném a prodávaném voze se už tato chyba samozřejmě nevyskytuje.

Při řešení tohoto problému bylo navrženo několik řešení, přímo ve výrobě, ale žádné nevedlo k úplné eliminaci propadů na střeše. Pro lepší představu o průběhu teplot v jednotlivých částech střechy bylo provedeno měření v několika základních bodech. Rozmístění měřících čidel je zobrazeno na následujícím obrázku (Obrázek 2).



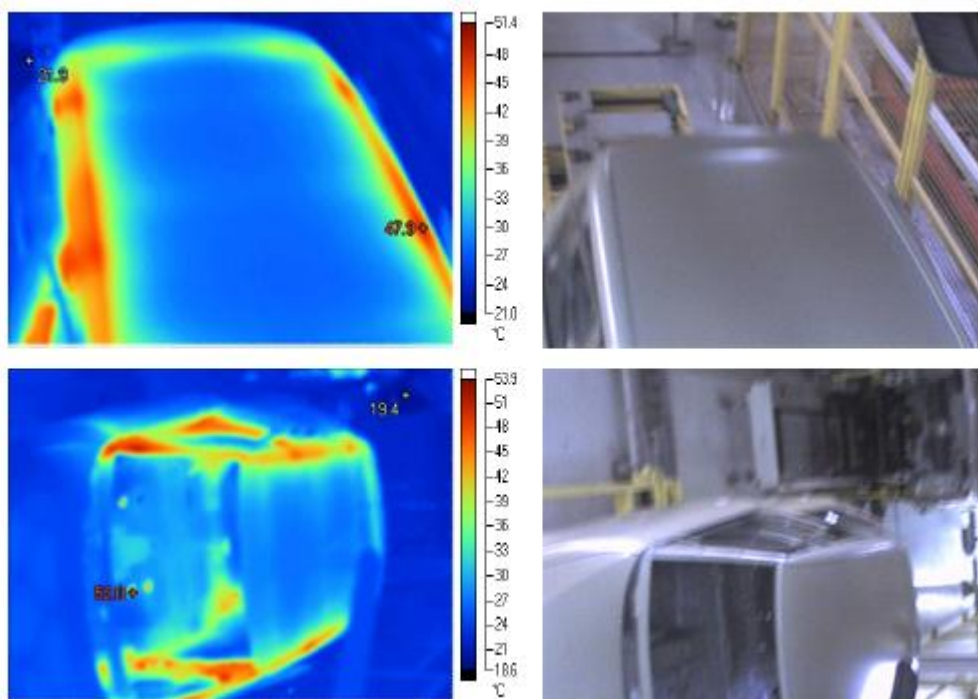
Obrázek 2 - Umístění měřících čidel

Červené šipky zobrazují umístění čidel mimo příčník střechy (čidla 1,2,3). Zelené šipky zobrazují čidla v místě příčníku (čidla 4,5). Průběh teplot v těchto místech při průchodu lakovnou zobrazuje následující graf (Obrázek 3).



Obrázek 3 - Průběh teplot v měřících místech

Červená vodorovná čára označuje limitní teplotu 165 °C, které musí být dosaženo ve všech částech karoserie a které musí být všechny části vystaveny po dobu nejméně 10 minut. Světle modrá čára označená číslem 0 označuje teplotu proudícího vzduchu, který celou karosérii zahřívá. Z grafu je patrné, že vnitřní části (vnitřní postranice a příčník) se prohřívají pomaleji a také pomaleji chladnou než části na vnější straně. Což je logické, protože se k těmto částem pomaleji dostává proud ohřátého vzduchu a při chladnutí se v takto chráněných částech déle drží zvýšená teplota. K eliminaci těchto rozdílů by mohlo vést, aby náběh teploty vzduchu při zahřívání a výběh při ochlazování byl pozvolnější, tak aby se vnitřní i vnější části ohřívali a chladly stejně rychle. Takové opatření by ovšem zdrželo celý proces výroby. Rozdílné rozložení teplot potvrzují také fotografie pořízené termokamerou po výjezdu z chladicí zóny (Obrázek 4). Na těchto fotografiích je ještě více patrné, které části chladnou nejpomaleji a které naopak nejrychleji. Co se týče střechy, jde hlavně o vnitřní výztuhu postranice zvanou díky svému tvaru jako „bumerang“ a výztuhu B – sloupků. Na jejich výrobu je z důvodu bezpečnosti a pevnosti skeletu použit velmi kvalitní materiál o větší tloušťce než v případě plechu střechy. Plech střechy nemá na pevnost skeletu automobilu a bezpečnost při případné kolizi žádný vliv. Plech střechy je s postranicí spojen laserovým svařem, který zajišťuje, že mezi těmito plechy nebude protékat voda. S příčníky je plech spojen speciálním tlumícím lepidlem, které je zde hlavně z důvodu eliminace nežádoucích zvuků při vibraci plechu střechy. Na pevnost skeletu toto lepidlo také nemá prakticky žádný vliv.



Obrázek 4 - Rozložení teplot

Po výjezdu z lakovny bylo v předvýrobní etapě pořízeno několik fotografií prohlubní a boulí na střeše (Obrázek 5). Na většině fotografií, oko laika žádné znatelné deformace ani nezaznamená, a to i přesto, že přesně ví, kde defekty hledat. To opět potvrzuje, že kvalita vyráběných vozidel je na velmi vysoké úrovni. Koncový zákazník by tyto chyby vůbec neviděl, ale i přesto se na jejich eliminaci a odstranění platí nemalé náklady.

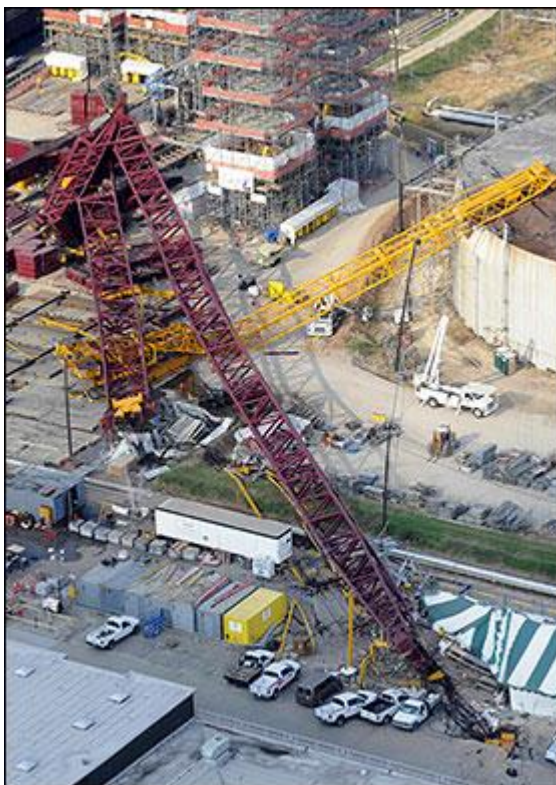


Obrázek 5 - Propady na střeše – předvýrobní stav



### 3. Teorie ztráty stability

Ztráta stability je problém, který nelze opomíjet při navrhování konstrukcí sloužících všem možným účelům. Ke ztrátě stability dochází ve velmi krátkém časovém okamžiku a její následky mohou být katastrofální. Při postupném zatěžování konstrukce dochází ke zvyšování napětí a deformace. Tyto přírůstky jsou zpočátku velmi malé a okem nepostřehnutelné až do určitého kritického okamžiku. V tomto velmi krátkém okamžiku dojde k prudké změně tvaru konstrukce, která způsobí, že konstrukce ztratí svojí únosnost a pod tíhou zatížení se zbortí. Pod tímto si můžeme představit např. ztrátu stability prutové konstrukce, kde stačí, aby jeden prut vybočil a konstrukce tak ztrácí stabilitu, nebo tenkostěnnou nádobu zatíženou vnějším přetlakem, kde stačí jen velmi malý propad a nádrž se zbortí. Velmi nebezpečné je právě to, že až do okamžiku ztráty stability nemusí být na konstrukci patrné žádné známky, které by blížící se kolaps předpovídaly a upozornily na něj.



Obrázek 6 - Ztráta stability jeřábu

### 3.1 Elastická ztráta stability

Zvaná též jako geometricky nelineární a materiálově lineární ztráta stability (buckling). Vyšetřování stability tělesa, nebo konstrukce v elastické oblasti spočívá vlastně v hledání kritického zatížení, které ztrátu stability způsobí. Úloha řešení stability je velmi podobná úloze určování vlastních frekvencí v oblasti technického kmitání. Cílem řešení charakteristické rovnice (rovnice 1) je nalezení vlastních čísel  $\lambda_i$  a vlastních tvarů, které udávají relativní poměr výchylek na mezi stability.

Je jasné, že největší význam při vyšetřování ztráty stability má nejnižší násobek vlastního zatížení, které způsobí ztrátu stability. Ovšem v důsledku různých nepřesností se může stát, že mezní stav konstrukce bude dán až druhým vlastním tvarem a tudíž je potřeba počítat několik prvních tvarů a porovnávat je.

$$[[K] + \lambda_i \cdot [K_\sigma]] \cdot \{R\} = 0 \quad (1)$$

$K$  ... matice tuhosti celého systému

$K_\sigma$  ... matice geometrické tuhosti (matice tuhosti vyvolaná počátečním předpětím)

$R$  ... vektor zobecněných deformačních parametrů

$\lambda_i$  ... vlastní číslo

K řešení problému hledání vlastních čísel existuje několik metod. Některé z nich jsou na následujících řádcích uvedeny a stručně popsány.

#### Rayleighova-Ritzova metoda

Velmi často nahrazuje metodu statické kondenzace a umožňuje nalézt první vlastní tvary. Vyšší tvary a frekvence nejsou nalezeny s tak vysokou přesností jako tvary nižší. Tato metoda je přibližná.

#### Inverzní iterace

Iterační metoda umí dojít k výsledkům s požadovanou přesností, tím že iterační proces je opakován, dokud není požadovaná přesnost docílena.

Metoda začíná zvolením počáteční aproximace řešením, která se v následujících krocích pokaždé zpřesňuje. Toto zpřesňování probíhá do té doby, dokud je rozdíl mezi po sobě jdoucími aproximacemi větší, než požadovaná přesnost. Pokud je rozdíl menší, výpočet končí.

### **Jacobiho metoda rotací**

Patří mezi nejstarší metody výpočtu vlastních tvarů. Ovšem k jejímu většímu rozšíření přispěl až rozvoj výpočetní techniky. Jedná se také o iterační metodu a používá se v ojedinělých případech, kdy potřebujeme znát všechny vlastní tvary.

### **Metoda iterace podprostoru**

Tato metoda neprovádí iterační proces pouze s jedním vektorem, ale s několika najednou.

### **Lanczosova metoda**

Lanczosova metoda používá všech vektorů k určení několika prvních vlastních tvarů. Tyto vektory se nazývají jako tzv. Lanczosovy vektory, které jsou vstupními vektory pro Rayleighovu-Ritzovu metodu. U té se zvolí počáteční vektor a metoda generuje posloupnost vektorů, která se nazývá jako Krylovova posloupnost. Tato metoda je v ANSYSu použita pro řešení úloh ztráty stability. Výhodou Lanczosovy metody je možnost použití i pro nesymetrické matice.

## **3.2 Nelineární ztráta stability tvaru**

Nelinearitu lze rozdělit do tří základních skupin. Na nelinearitu geometrickou, která je charakterizována velkými poměrnými deformacemi a posunutími. Vychází z geometrických vztahů a rovnic, které dobře popisují vliv velkých posunů a průhybů. Na nelinearitu materiálovou vycházející z fyzikálních rovnic. Ta je charakterizována creepem, relaxací, hyperelasticitou a jinými zvláštnostmi. Poslední skupinou je nelinearita

strukturální. Ta se vyznačuje vznikem, nebo zánikem vazeb, kontakty mezi tělesy, aj. Nelineární soustavu rovnic udává následující vztah (rovnice 2).

$$[K_{\{R\}}]\{R\} = F \quad (2)$$

Soustava rovnic je nelineární, protože matice tuhosti  $K$  je zde funkcí posunutí.

K řešení nelineárních úloh lze přistupovat dvěma směry. Prvním je, že se programu zadá konečná hodnota zatížení a první odhad fyzikálních konstant mezi napětím a deformací. Tento postup též bývá označován jako full load postup. Druhým a obecnějším postupem je tzv. inkrementální přístup k řešení. Tento postup spočívá v rozdělení celkového zatížení na určitý počet částí. Při výpočtu je pak konstrukce postupně zatěžována tak, že v každém kroku výpočtu se zatížení zvýší o jednu část až do maximálního zatížení. Plného zatížení ovšem nemusí být ve všech případech dosaženo. Tohoto postupu využívá např. Newton-Raphsonova metoda. Kritická hodnota vektoru zatěžujících sil se získá z posledního kroku výpočtu, kdy ještě proběhla konvergence. Níže uvedená rovnice (rovnice 3) udává podmínku rovnováhy pro konstrukci jako celek. Její řešení Newton-Raphsonovou metodou spočívá v hledání přírůstku posuvu  $\Delta r$  pro přírůstek zatížení  $\Delta R$ . Pro nový vektor posunů, který je dán součtem  $\Delta r + r$ , se dopočítá tečná matice tuhosti  $K_t$  a vektor  $R - F$  se připočítá v dalším kroku k zatížení konstrukce. Existuje i modifikovaná newton-Raphsonova metoda, která nepočítá nové tečné matice tuhosti v každém kroku, ale pouze na začátku každého nového zatěžovacího přírůstku.

$$K_t \Delta r = \Delta R + (\lambda \bar{R} - F) \quad (3)$$

Jakmile začne malý přírůstek síly způsobovat velké přírůstky deformace, výpočet přestane konvergovat. V takovém okamžiku je přírůstek zatížení v jednom kroku snižován a výpočet se opakuje. Pokud nedojde ke konvergenci ani s nejnižším přírůstkem zatížení, výpočet končí. Volba minimálního přírůstku zatížení je úkol pro výpočtáře daného problému. Ztráta stability patří mezi problémy, který způsobuje právě to, že velmi malý přírůstek síly způsobí velká posunutí.

Další metodou sloužící k řešení nelineárních problémů je metoda délky oblouku (arc-length method). Touto metodou lze řešit i úlohy, kde se na dráze zatížení nacházejí tzv. body zvratu (B.Z), bifurkační body (B.B), nebo limitní body (L.M) (Obrázek 7). Tzn., že zatížení nemusí pouze narůstat, ale může i klesat a s tím souvisí i pokles deformace. S takovými úskalími si Newton-Rapshonova metoda neumí poradit. U metody délky oblouku je parametr  $\lambda$ , určující hladinu zatížení, proměnná. Následující rovnice (rovnice 4) udává vektor nevyvážených sil.

$$g(\lambda, r) = \lambda \bar{R} - F(r) \quad (4)$$

Při řešení úlohy hledáme takové  $r$ , pro který se vektor nevyvážených sil rovná nulovému vektoru. Proces je řízen přírůstkem délky oblouku zatěžovací dráhy, který je v přírůstkovém tvaru vyjádřen takto:

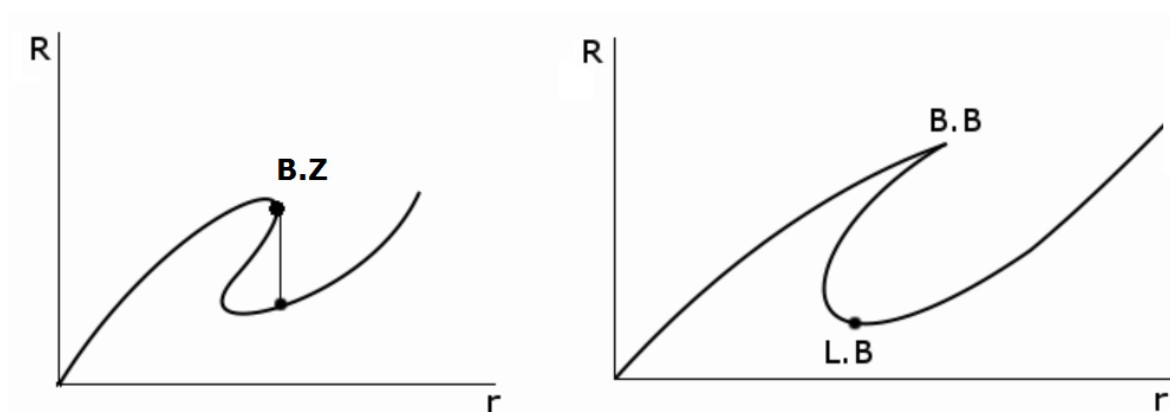
$$a = \Delta r^T \Delta r + \Delta \lambda^2 \psi^2 \bar{R}^T \bar{R} - \Delta l^2 \quad (5)$$

$\Delta l$  ... poloměr kulové plochy v prostoru  $(\lambda, r)$

$a$  ... kvadrát nevyrovnané délky oblouku

$\psi$  ... skalární parametr vyjadřující poměr zvolených měřítek pro  $\lambda$  a  $r$

Úloha má  $n+1$  neznámých, protože parametr  $\lambda$  je proměnná a soustavy rovnic jsou dány 2 výše uvedenými vztahy. Pokud tyto vztahy rozvineme do Taylorových řad a upravíme, získáme soustavu rovnic, ve které můžeme v každé iteraci vypočítat změny  $r$  i  $\lambda$ . V této soustavě rovnic není matice soustavy singulární ani v případě, že je singulární tečná matice tuhosti a lze ji tedy používat i pro zatěžovací dráhy, které obsahují limitní body, aj.



Obrázek 7 - Kritické body

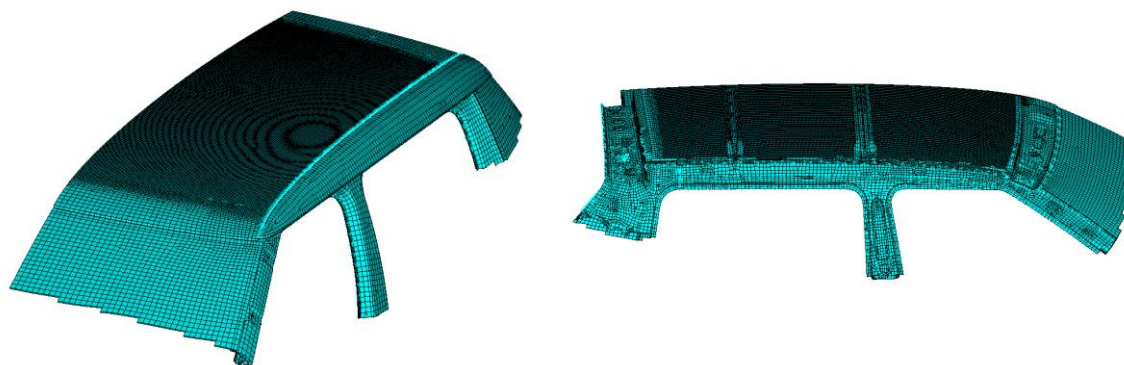
## 4. MKP

Metoda konečných prvků (MKP, mezinárodně FEM – Finite Element Method) je moderní metoda využívaná k technickým výpočtům k velmi širokému spektru různých analýz. Princip metody spočívá v diskretizaci kontinua na určitý (konečný) počet prvků. Kontinuum v tomto případě představuje 3D model vytvořený v libovolném CAD programu. Každý prvek má určitý počet uzlů (podle typu prvku), ve kterých jsou počítány prvotní hledané parametry. Ve většině technických aplikací jde hlavně o výpočet pole posunutí, proto se jedná o deformační variantu MKP. Díky těmto parametrům je možné velmi efektivně odhalit slabá místa konstrukce a pro takovou konstrukci stanovit dovolené hodnoty namáhání. Také je možné na základě těchto výsledků konstrukci následně vylepšit, nebo nějakým způsobem optimalizovat.

Veškeré výpočty související s diplomovou prací byly prováděny ve výpočtovém MKP softwaru ANSYS ve verzi 12.1.

### 4.1 Popis modelu

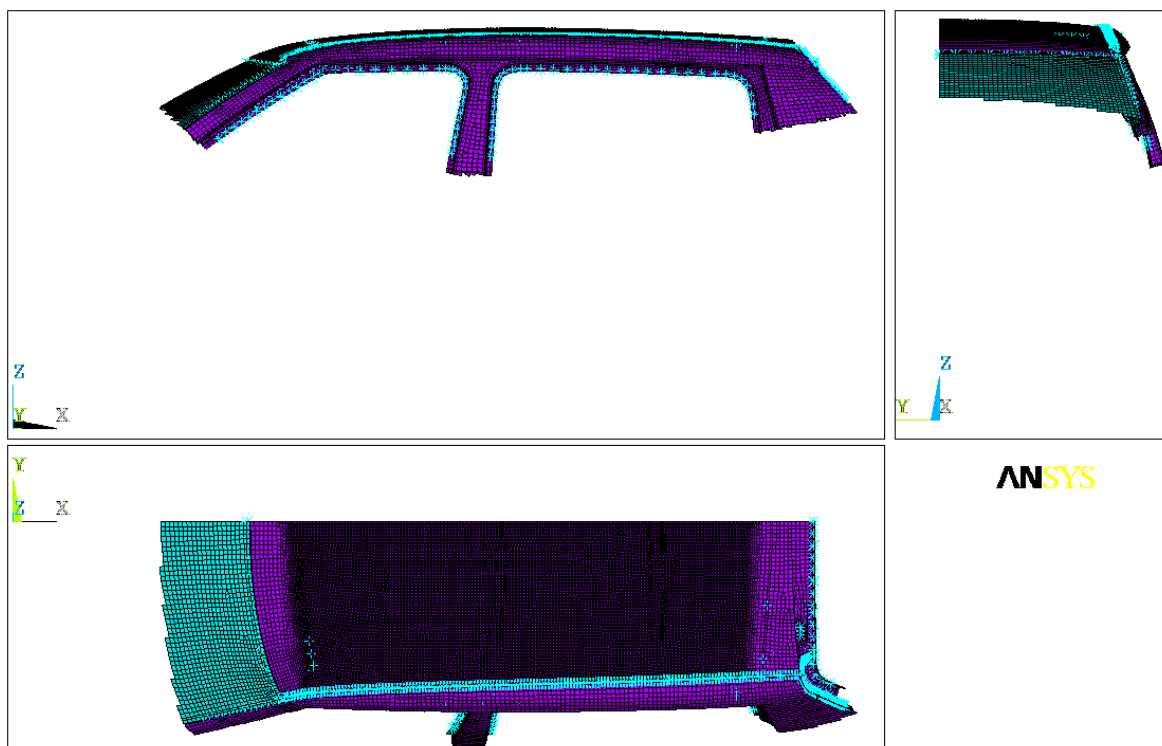
V této diplomové práci se jedná o řešení propadů na střeše automobilu. Bylo by proto zbytečné, aby byl k výpočtům používán model celého automobilu. Byla tedy vybrána jen střecha a její nejbližší související části. Karoserie automobilu má v oblasti střechy samozřejmě rovinu symetrie. Té bylo také využito, aby se dosáhlo co nejvyššího snížení řádu úlohy a byl ušetřen čas potřebný k výpočtům (viz. Obrázek 8).



Obrázek 8 - MKP model

Těmito úpravami bylo dosaženo, že konečný model, na kterém byly prováděny výpočty, obsahuje 61839 uzlů a 76412 elementů. Počet stupňů volnosti modelu je 307 471.

Rovina symetrie je dána rovinou XZ souřadného systému modelu. Počátek souřadného systému leží na ose přední nápravy uprostřed a je tedy mimo model (Obrázek 9). MKP model se nachází v záporné části osy Y a v kladné části osy X a Z.



Obrázek 9 - Počátek souřadného systému



## 4.2 Typy elementů

V modelu je použito celkem 5 druhů elementů. Základním a nejvíce zastoupeným je SHELL element, který je použit pro modelování veškerých plechů, ze kterých se střecha skládá a také pro modelování čelního skla. Dalším použitým elementem je SOLID. Tímto elementem jsou modelována všechna lepidla spojující některé části (např. střechu a příčník). Další elementy souvisí se svarovými spoji. Jsou to elementy BEAM, TARGET a CONTA. Elementem typu BEAM je modelován samotný svarový spoj. Elementy TARGET a CONTA souvisí se vzájemným spojením svaru a modelu. Veškeré použité elementy, včetně typu a celkového počtu v modelu uvádí následující tabulka (Tabulka 1).

Typ elementu	Poč. elementů	Poč. uzlů
<b>SHELL181</b>	49562	51396
<b>SOLID185</b>	4184	10186
<b>BEAM4</b>	753	1478
<b>TARGE170</b>	20435	11909
<b>CONTA175</b>	1478	1478

Tabulka 1 - Typy elementů

Charakteristiky použitých elementů:

SHELL181

- 4-uzlový prvek
- 6 stupňů volnosti

SOLID185

- 8-mi uzlový prvek
- 3 stupně volnosti

BEAM4

- 2 uzlový prvek
- 6 stupňů volnosti

#### TARGE170

- 8-mi uzlový prvek
- 6 stupňů volnosti

#### CONTA175

- Jedno uzlový prvek
- 3 stupně volnosti

Plechys použité na výrobu karoserie jsou samozřejmě různé. Liší se jak použitým materiálem, tak tloušťkou. Tloušťka plechu se do modelu v ANSYSu zanáší tzv. Real konstantou přiřazenou jednotlivým elementům. Na modelu střechy jsou použity plechy o tloušťkách od 0,7 mm až po tloušťku 2 mm. Čelní sklo má tloušťku 4,4 mm. Počet real konstant charakterizujících tloušťku materiálu je 22. Celkový počet Real konstant v modelu je mnohem větší. Všechny kromě 22 zmíněných souvisí se svarovými spoji, kde charakterizují průměr bodového spojení. Konečný počet Real konstant je 1501.

### 4.3 Okrajové podmínky

Volba okrajových podmínek je jednou z nejkomplikovanějších operací při vytváření výpočtového modelu a ve velkém rozsahu ovlivňuje kvalitu a důvěryhodnost výsledků. Tyto okrajové podmínky musí nahrazovat skutečné uchycení konstrukce při svém provozu. Musí zamezit takovému pohybu, který konstrukce nevykonává a povolit takový pohyb, jaký je umožněn i ve skutečnosti. Nahradit tímto způsobem skutečnost bývá mnohdy velmi složité a zdlouhavé, než je dosaženo co nejlepší shody.

V modelu střechy automobilu byly použity okrajové podmínky omezující posuv konstrukce ve směrech souřadného systému, omezující rotaci okolo os souřadného systému

a symetrické okrajové podmínky. Umístění okrajových podmínek nebylo součástí řešení této práce, protože byly součástí modelu, který byl dodán zadavatelskou firmou.

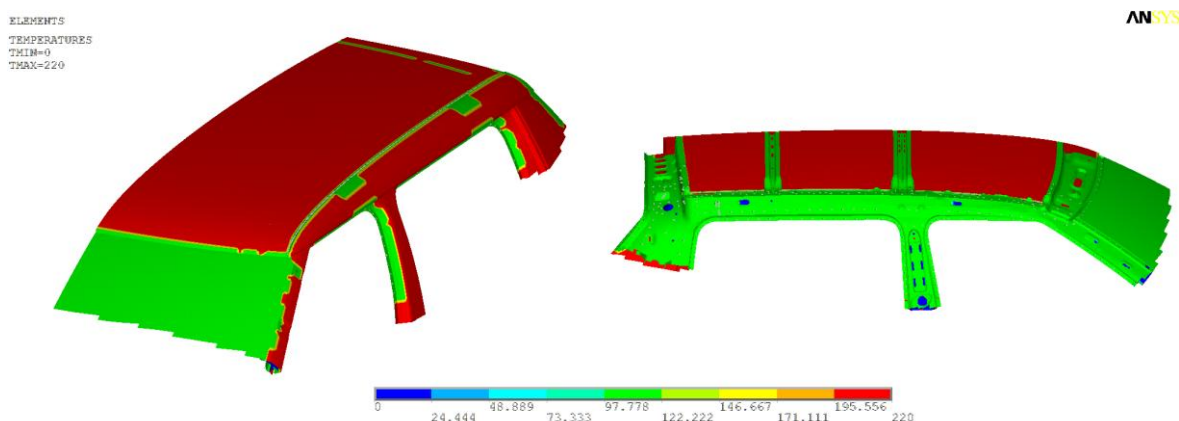
Veškeré okrajové podmínky se zadávají do uzlů elementů. Pokud jsou při tvorbě modelu zadávány na jiné, např. geometrické entity, jsou při výpočtu do uzlů převedeny automaticky.

Symetrické okrajové podmínky jsou na modelu logicky zadané na všechny uzly ležící v rovině symetrie (celkem 501 uzlů). Posuvům je zamezeno v uzlech patřících A a C sloupku. V případě sloupku A jde o 3 uzly, ve kterých je odebrán posuv ve směrech os X a Z. U zadního C sloupku je odebrán posuv ve směru osy Z u dvou uzlů.

Mezi okrajové podmínky patří i samotné zatížení součástí. V rámci této práce jde pouze o teplotní namáhání. Žádné vnější síly (ani gravitační) zde nejsou uvažovány. Jak bylo psáno v úvodu, karosérie se při vypalování barev zahřívá nerovnoměrně. Tuto skutečnost je nutné zachytit i při zadávání teplot. Velikost teplotního namáhání byla tedy rozdělena do třech částí:

1. teploty na vnějším povrchu karoserie – nejvyšší
2. teploty ve vnitřních částech karoserie – střední
3. teploty na částech uvnitř konstrukce – nejnižší

Při samotných výpočtech, pokud jsou teploty měněny, je nutné zachovat gradient mezi teplotami.



Obrázek 10 - Teplotní okrajové podmínky

Výše uvedený obrázek (Obrázek 10) zobrazuje zadané teplotní pole o maximální teplotě 220 °C. Tato maximální teplota je zadaná na střechu a vnější postranici. Vnitřní

části (příčníky, vnitřní postranice) jsou zatíženy teplotou 110 °C. Díly schované pod vnějšími plechy, které nejsou na obrázku moc patrné (jen místy prosvítá modrá barva) jsou zatíženy teplotou 0 °C. Takovou teplotou v lakovně samozřejmě karoserie namáhána není, ale tato skutečnost není v samotném výpočtu důležitá. Důležitý je teplotní gradient mezi teplotami.

#### 4.4 Materiálové modely

Karosérie automobilu je vyráběna převážně z kovových materiálů. Ovšem najdou zde samozřejmě uplatnění i jiné materiály. V oblasti střechy není, ale toto zastoupení tak markantní jako v jiných částech vozu. Je to také způsobeno tím, že před lakováním karosérie není na vozidle umístěno mnoho součástí, které se montují až po tomto procesu.

Každý materiál má odlišné chování a toto chování je v MKP modelu potřeba uvažovat. To se dělá používáním různých materiálových modelů a zadáváním různých materiálových konstant. Pokud materiálový model má popisovat pouze chování materiálu v lineární oblasti stačí ve většině případů zadávat pouze modul pružnosti označovaný písmenem  $E$  [MPa] a Poissonovu konstantu označovanou řeckým písmenem  $\mu$  [-]. Ta udává poměr mezi příčnou a podélnou poměrnou deformací. V závislosti na použité analýze se tyto konstanty doplňují např. o hustotu a tepelnou roztažnost, tak jako v případě této práce.

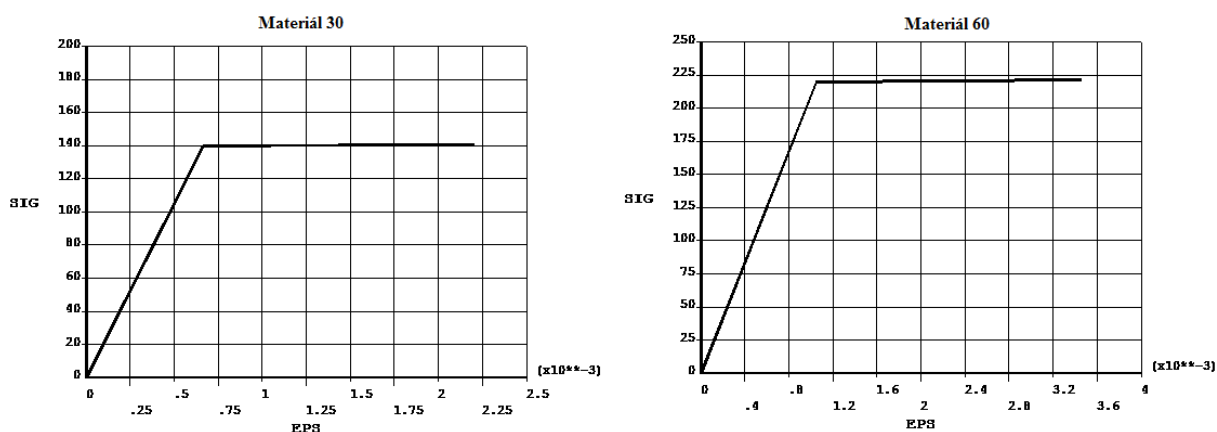
Pokud ovšem má materiálový model popisovat nelineární chování materiálu, je situace mnohem složitější. Pro popis chování materiálu v této oblasti existuje spousta různých modelů a není jednoduché vybrat ten správný.

Materiály použité na jednotlivé díly vozu jsou dány firmou ŠKODA AUTO a.s.. Veškeré vlastnosti a konstanty byly tedy firmou poskytnuty. V MKP modelu střechy je použito celkem 9 materiálových modelů (Tabulka 2), z čehož jsou 3 poslední ještě doplněny o nelineární modely.

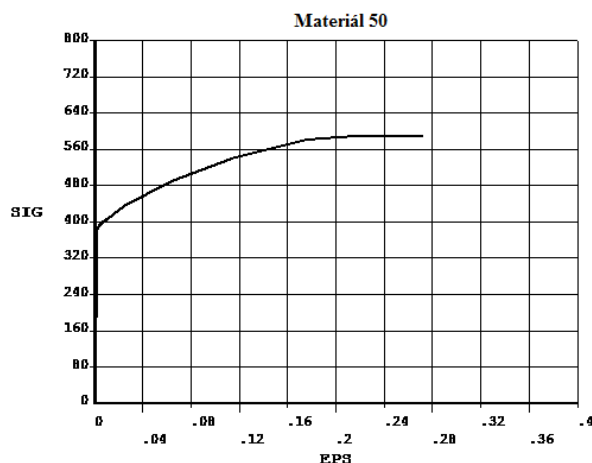
Číslo materiálu	Modul pružnosti E [MPa]	Poissonovo číslo [-]	Teplotní roztažnost $\left[\frac{1}{K}\right]$	Hustota $\left[\frac{t}{mm^3}\right]$
1	210000	0.3	$1.2 \cdot 10^{-5}$	$7.85 \cdot 10^{-9}$
3	74000	0.22		$2.5 \cdot 10^{-9}$
4	6.256	0.36		$1.2 \cdot 10^{-9}$
5	4.896	0.36		$1.2 \cdot 10^{-9}$
7	417	0.39		$1.2 \cdot 10^{-9}$
10	417	0.39		$1.2 \cdot 10^{-9}$
30	210000	0.3		$7.85 \cdot 10^{-9}$
50	210000	0.3		$7.85 \cdot 10^{-9}$
60	210000	0.3		$7.85 \cdot 10^{-9}$

Tabulka 2 - Přehled materiálů použitých v modelu

U nelineárních materiálů 30 a 60 je k lineárnímu modelu doplněn Bilineární nelineární model, který je zadán dvěma konstantami. Jde o mez kluzu a tangenciální modul pružnosti. Závislost lze pak vykreslit grafem, na jehož osách je napětí a deformace (Obrázek 11). U materiálu 50 je zadán Multilineární isotropický model, který je zadán 12-ti dvojicemi hodnot napětí - deformace, charakterizujících chování materiálu. Tyto hodnoty lze opět zanést do grafu v souřadném systému napětí – deformace (Obrázek 12).

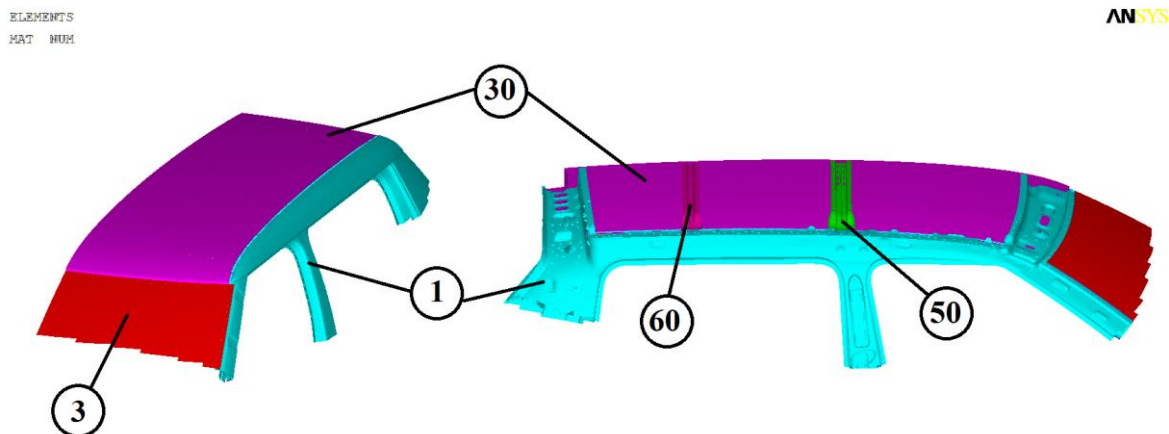


Obrázek 11 - Grafy pro materiály 30 a 60



Obrázek 12 - Graf pro materiál 50

Materiály, které jsou označeny čísly 1, 30, 50 a 60 jsou modelovány všechny ocelové části v modelu. Kromě prvního jsou všechny nelineární. Materiál číslo 30 je přiřazen plechu střechy. Materiál 50 je pro přední příčník a 60 pro zadní příčník. Čelní sklo má číslo materiálu 3 a číslo 4 je pro lepidlo, kterým je sklo přilepeno ke karosérii. Materiál číslo 5 je pro lepidlo, které je umístěno mezi plech střechy a jednotlivé příčníky. Materiály 7 a 10 jsou lepidla, která se nacházejí v postranici. Barevně odlišené použité materiály jsou vykreslené na následujícím obrázku (Obrázek 13). Na obrázku nejsou vidět pouze materiály lepidel, které jsou schovány pod plechy.



Obrázek 13 - barevně odlišené materiály v modelu

## 4.5 Import modelu

Firma ŠKODA AUTO a.s. používá k výpočtům ve většině případů program NASTRAN. V době vypracování této diplomové práce nebyl tento software na VŠB-TUO k dispozici a upřednostňovaným výpočtovým softwarem byl program ANSYS. Muselo proto být přistoupeno k importování diskretizovaného modelu z NASTRANu do ANSYSu, což nakonec vedlo k řešení spousty nečekaných problémů. Postup importu byl nejprve laděn na triviálních úlohách, aby bylo zjištěno, zda bude fungovat bez problémů a jestli bude vůbec možný. Nejdůležitější bylo ověřit, zda dochází ke správnému importu veškerých elementů a okrajových podmínek. Jako nejvhodnější způsob přenosu modelu z NASTRANu do ANSYSu se jevil přes použití CDB souboru. Do tohoto souboru umí NASTRAN data z modelu exportovat a ANSYS tento typ souboru umí bez jakýchkoliv úprav použít jako vstup. ANSYS dokázal importovat veškeré elementy typu SHELL a SOLID. Jediné, které nedokázal importovat, byly elementy svarů. Ty jsou v NASTRANu označovány jako CWELD elementy. Tyto elementy bylo tedy nutné v ANSYSu znovu vytvořit. Svarů je samozřejmě na karoserii automobilu velké množství a modelovat svary ručně po jednom, by bylo nepředstavitelně zdlouhavé. Bylo tedy vytvořeno makro, které tuto práci velmi ulehčilo, i když ne úplně zautomatizovalo. Makro je textový soubor obsahující příkazy ANSYSu, které se při spuštění makra vykonají. Ve spojení s cykly, si lze takto velmi ulehčit práci při opakujících se činnostech. Na karoserii jsou 3 typy svarů: 2 bodový, 3 bodový a laserový svar. Dvou bodový svar a laserový svar se modelují stejným způsobem. Laserový svar je vlastně řada 2 bodových svarů hustě nasázených za sebou. Tří bodový svar spojuje 3 plechy najednou, a proto se makro pro jeho tvorbu lišilo od makra na tvorbu předešlých svarů. Spojované plechy byly jednoznačně identifikovány podle konstanty přiřazené SHELL elementu (Real konstanta) a toho bylo při vytváření makra využito. Makra, kterými byly svary vytvářeny, jsou umístěny v přílohách (příloha A a B). K vytvoření svarů používá ANSYS prvek MPC184, který má velké množství konfigurací. Ke spojení s modelem jsou využity prvky CONTA a TARGET. Při dalších výpočtech ovšem tato konfigurace přinesla další problémy. Při použití prvku MPC184 v nastavení jako tuhý prut (Rigid Link), nebo tuhý nosník (Rigid Beam) je možno provádět výpočty metodou přímé eliminace (Direct Elimination), nebo Lagrangeových multiplikátorů (Lagrange Multiplier). Ovšem metoda přímé eliminace sice podporuje výpočty lineárního ztráty stability, ale není s ní možné počítat úlohy, které obsahují teplotní roztažnost. Tu

naopak podporuje metoda Lagrangeových multiplikátorů, ovšem s ní nelze počítat lineární ztrátu stability. Použití jiných konfigurací (Weld, Universal, ...) k vyřešení problémů ve výpočtech nevedlo. V lineárním výpočtu se nedařilo vypočítat žádné kritické tvary a nelineární výpočet nekonvergoval, nebylo možné počítat s velkými deformacemi. Bylo tedy nutné hledat další řešení, se kterým mi pomohla až konzultace v Brněnské firmě SVSFEM, která je dodavatelem programu ANSYS pro Českou republiku a Slovensko. K vyřešení problému pomohlo nahrazení elementu MPC184 elementem BEAM4, který už žádné problémy při výpočtu nezpůsobil.



#### 4. Lineární výpočet

Lineární výpočet ztráty stability se skládá ze dvou částí. První částí je statický výpočet, u kterého se vypočítá matice geometrické tuhosti (tzv. Prestress effects). Poté následuje samotný výpočet ztráty stability (tzv. Eigen Buckling), který vypočte libovolný počet kritických tvarů. Většinou je nejdůležitější první tvar, ale z důvodů porovnávání blízkých tvarů je vhodné jich vypočítat více. K výpočtu ztráty stability ANSYS používá Lanczsovu metodu. Jak je psáno výše, jedná se o lineární výpočet, a proto nejsou do výpočtu zahrnuty nelineární vlastnosti materiálů.

Výsledkem výpočtu jsou tedy kritické součinitele a graficky zobrazené kritické tvary. Kritické součinitele jsou vlastně čísla, kterými když vynásobíme původní zatížení, získáme hodnotu kritického zatížení, při kterém dojde ke ztrátě stability.

##### 5.1 Lineární výpočet v programu ANSYS

Pokud chceme počítat v ANSYSu ztrátu stability metodou Eigen-Buckling, musíme jako první provést statický výpočet, ve kterém je vypočítána matice geometrické tuhosti (v ANSYSu volba *Calculate prestress effects*). Po provedení statického výpočtu následuje výpočet ztráty stability metodou analýzou Eigen-Buckling, kde je důležité nastavit, kolik tvarů chceme vypočítat. V případě této práce jde o 8 součinitelů. Vypočítané kritické součinitele udává následující tabulka (Tabulka 3).

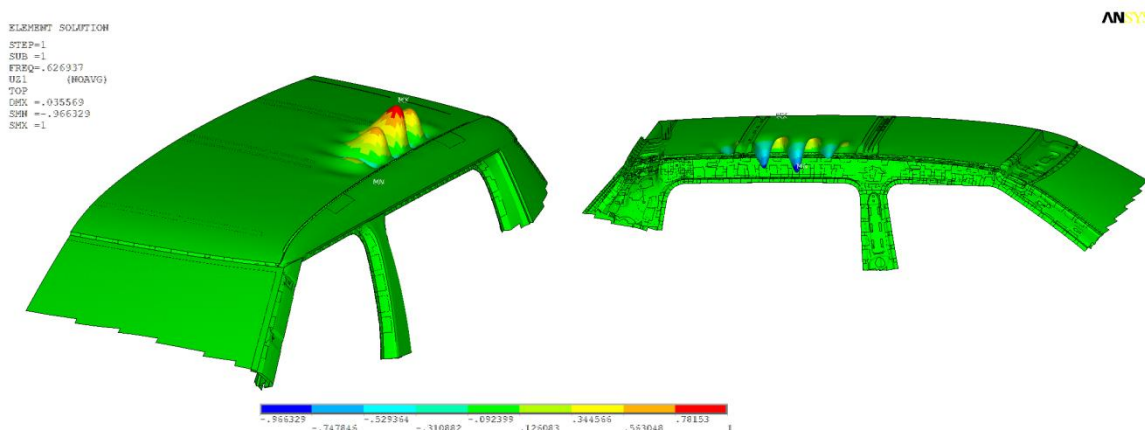
Kritický součinitel	
1.	0.62694
2.	0.62858
3.	0.66300
4.	0.66638
5.	0.70676
6.	0.70763
7.	0.75226
8.	0.75660

Tabulka 3 - Kritické součinitele

Model byl při lineárním výpočtu zatížen teplotami od 0 do 220 °C. Po vynásobení teplot prvním kritickým součinitelem zjistíme, že ztráta stability nastane už při teplotě cca 138 °C.

$$T_{CL} = 220 \cdot 0.62694 = 137,9 \text{ °C}$$

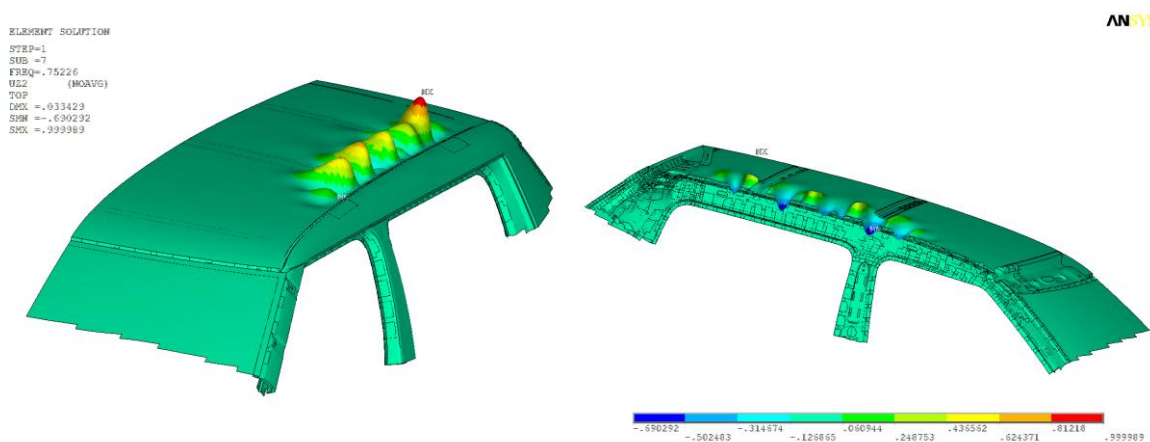
Na níže uvedeném obrázku (Obrázek 14) je zobrazen první kritický tvar propadu střechy z programu ANSYS. Na obrázku je vidět, že propad nastává mezi příčníky střechy.



Obrázek 14 - Propad střechy – ANSYS

Výsledky tvaru deformace jsou jen poměrná čísla a nejde o číselně vyjádřené skutečné deformace. Pokud bychom chtěli znát skutečné deformace a popř. i napětí ve chvíli, kdy dojde k propadu střechy, musíme vynásobit teplotní zatížení kritickým součinitelem a provést klasický statický výpočet. Tím získáme deformace a napětí v okamžiku před ztrátou stability a zborcení konstrukce.

Další tvary propadů střechy jsou charakteristické větším množstvím různých boulí a prohlubní a vzdalují se realitě. Následující obrázek zobrazuje propad pro 7. kritický součinitel o hodnotě 0.75226 (Obrázek 15).

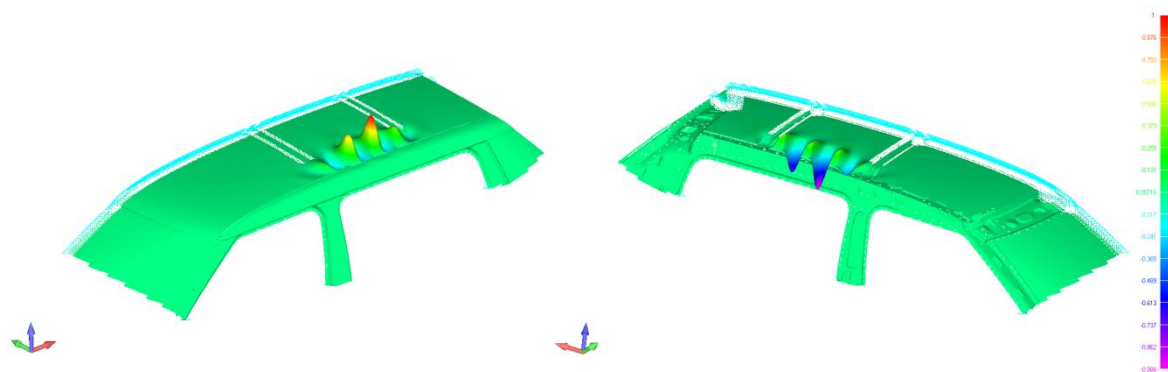


Obrázek 15 - Propad střechy pro 7. krit.souč. - ANSYS

### 5.2 Srovnání výsledků lineárních výpočtů ANSYS – NASTRAN

Ve firmě ŠKODA AUTO a.s. prováděli výpočty ve výpočtovém programu NASTRAN a jak se dalo předpokládat, výsledky nejsou úplně stejné. Tímto softwarem bylo zjištěno, že propad střechy nastane při teplotě 123 °C. Rozdíl kritických teplot činí tedy  $\Delta t = 138 - 123 = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tuto odchylku lze připsat hlavně tuhosti svarových spojů v oblasti střechy a postranice. Každý program modeluje svary a jejich spojení s okolními částmi trochu jiným způsobem a z tohoto důvodu dochází k rozdílům. Z tohoto pohledu nejsou, ale odchylky nijak velké a lze konstatovat, že bylo dosaženo dobré shody.

Následující obrázek zobrazuje výsledky získané programem NASTRAN ve firmě ŠKODA AUTO a.s (Obrázek 16). Při porovnání výsledků z ANSYSu a NASTRANu zjistíme, že propady mají stejný charakteristický tvar a dochází k nim ve stejném místě.



Obrázek 16 - Propad střechy – NASTRAN

U výsledků obou propadů jsou zobrazeny posunutí jen ve směru osy Z a oba výsledky jsou normovány na jedničku, aby bylo možné lépe je porovnávat.

Lineární výpočet propadu střechy má spíše informativní charakter a nevypovídá úplně přesně o skutečné situaci, která může nastat. Ve většině případů následuje po tomto výpočtu výpočet nelineární.

## 5. Nelineární výpočet

Při nelineárním výpočtu jsou v modelu uvažovány i nelineární vlastnosti materiálů, které mohou velmi ovlivnit chování celé konstrukce. Výpočet byl prováděn inkrementálním postupem, tzn., že celkové zatížení je rozděleno na určitý počet částí a konstrukce je zatěžována postupně. Přírůstek zatížení je konstantní, dokud výpočet konverguje. Pokud konvergovat přestane, jsou tyto přírůstky postupně zmenšovány až do zvolené minimální hodnoty. Nelineární výpočet trvá několikanásobně delší dobu než výpočet lineární. Při vyhodnocování výsledků nelineárního výpočtu je třeba si uvědomit, že celková deformace je dána součtem deformace elastické a deformace plastické a je tedy důležité kontrolovat podíl plastické složky na celkové deformaci.

$$\varepsilon_C = \varepsilon_p + \varepsilon_E$$

V rámci řešení této práce bylo provedeno několik desítek výpočtů, než byl výpočet optimálně odladěn. Výsledky získané programem ANSYS, byly opět srovnávány s výsledky z programu NASTRAN.

### 6.1 Nelineární výpočet v programu ANSYS

Nastavení nelineárního výpočtu spočívá v nastavení časových kroků, konvergenčních kritérií a mnoha dalších věcí v návaznosti na složitost výpočtu. Nastavení solveru pro nelineární výpočet je zobrazen na následujícím obrázku (Obrázek 17).

The image shows the 'Nonlinear' tab of the ANSYS Workbench solver options. The 'Basic' sub-tab is active. In the 'Analysis Options' section, 'Large Displacement Static' is chosen from the dropdown menu, and the checkbox for 'Calculate prestress effects' is not checked. The 'Time Control' section has 'Time at end of loadstep' set to 1, 'Automatic time stepping' set to 'Prog Chosen', 'Number of substeps' is not selected, 'Time increment' is selected, 'Time step size' is 0.05, 'Minimum time step' is 0.000001, and 'Maximum time step' is 0.05. The 'Write Items to Results File' section has 'All solution items' selected, and the list of items to write includes 'Nodal DOF Solution', 'Nodal Reaction Loads', 'Element Solution', 'Element Nodal Loads', and 'Element Nodal Stresses'. The 'Frequency' section is set to 'Write every Nth substep' with N = 2.

Obrázek 17 - Nastavení nelineárního výpočtu

Dále bylo nastaveno:

Konvergenční silové kritérium: 0.004

Počet iterací: 25

Konečný čas 1 (Time at end of loadstep) neoznačuje čas jako takový. Jedná se vlastně o násobek zatížení a v tomto konečném čase tedy působí na model plné zatížení.

Minimální časový krok (Minimum time step) označuje hodnotu, na kterou až může program při výpočtu snížit přírůstek časového kroku, pokud není splněno konvergenční kritérium. Maximum (Maximum time step) označuje naopak maximální zvětšení časového kroku, pokud konvergence probíhá. Tím lze dosáhnout rychlejšího průběhu výpočtu, ovšem může dojít k tomu, že v průběhu výpočtu nezachytíme nějaké podstatné děje, pokud bude tato hodnota nepřiměřeně velká. Počet iterací udává maximální počet opakování výpočtu v jednom kroku. Při výpočtu byl zapisován každý druhý vypočítaný krok, což je pro vyhodnocení výsledků dostatečné a výsledkový soubor díky tomu zabírá méně diskového prostoru, než když by byl zapisován každý krok. Konvergenční silové kritérium splnění silové rovnováhy vnitřních a vnějších sil ve všech uzlech modelu.

## 6.2 Výsledky nelineárního výpočtu

Jako výsledek nelineárního výpočtu obdržíme soubor, ve kterém jsou v určitých časových krocích zapsány vypočítané hodnoty. Hustota těchto časových kroků je závislá na našem původním nastavení solveru. Pokud výpočet proběhl až do plného zatížení, musí mít poslední časový krok, dle našeho nastavení, hodnotu 1. Pro každý tento časový krok si při vyhodnocování výsledků můžeme vykreslit pole deformací, napětí a jiných veličin, které nás zajímají.

Z časových kroků výpočtu vidíme, jak výpočet probíhal, kdy program snižoval, nebo naopak zvyšoval časový krok. Z toho lze usoudit, kdy se začalo ve struktuře dít něco neobvyklého. Následující tabulka (Tabulka 4) uvádí několik kroků provedeného výpočtu. Kompletní tabulka se všemi kroky je vložena v přílohách (příloha C).

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	0.10000	1	2	5
4	0.40000	1	8	28
5	0.47250	1	10	58
13	0.83551	1	26	179
14	0.86242	1	28	201
15	0.91288	1	30	209
16	0.97343	1	32	221
17	1.0000	1	33	225

Tabulka 4 – Zapsané kroky nelineárního výpočtu

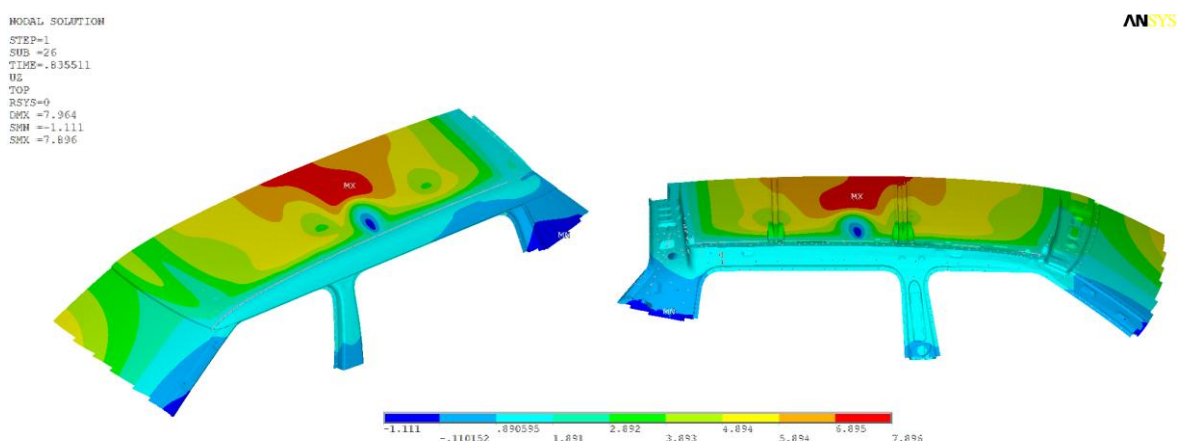
Po vykreslení výsledků bylo zjištěno, že k propadu střechy začíná docházet v substepu 26 a tedy při teplotě 183,8 °C.

$$T_{CN} = 0,8355 \cdot 220 = 183,81 \text{ °C.}$$

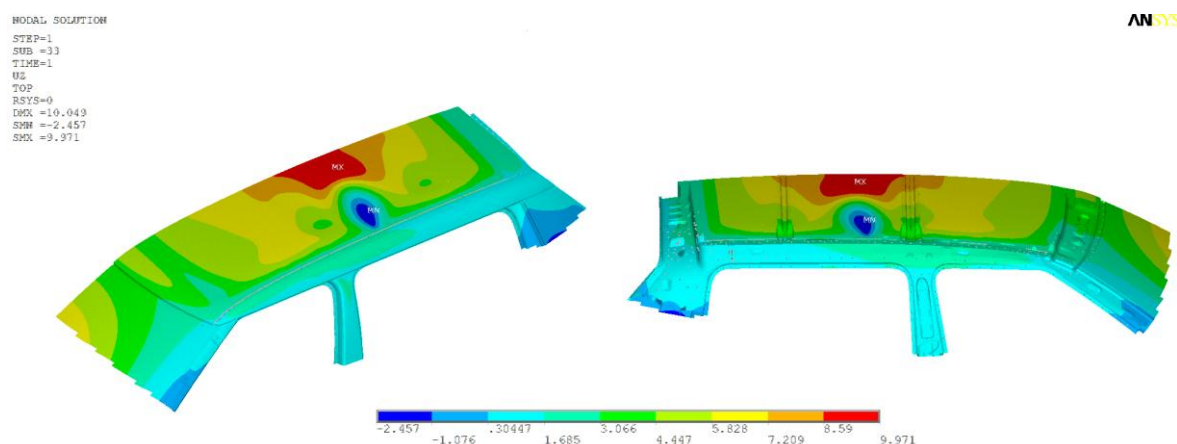
## Simulace propadů střechy automobilu a návrh změn vedoucích ke zvýšení odolnosti střechy

Tato teplota je vyšší, než u lineárního výpočtu. Způsobuje to nelineární chování materiálu, kdy závislost napětí na deformaci není lineární, a při dosažení meze kluzu se tato závislost řídí tangenciálním modulem pružnosti, kde je nárůst napětí pozvolnější. Závislosti napětí na deformaci pro nelineární materiály použité v modelu jsou zobrazeny v kapitole 4.4.

Na následujících obrázcích jsou vykresleny deformace ve směru osy Z z okamžiku začínajícího propadu (Obrázek 18) a pro plné zatížení modelu (Obrázek 19). Jako začátek propadu je brán okamžik, kdy se v plechu střechy objeví první záporná deformace ve směru osy Z.



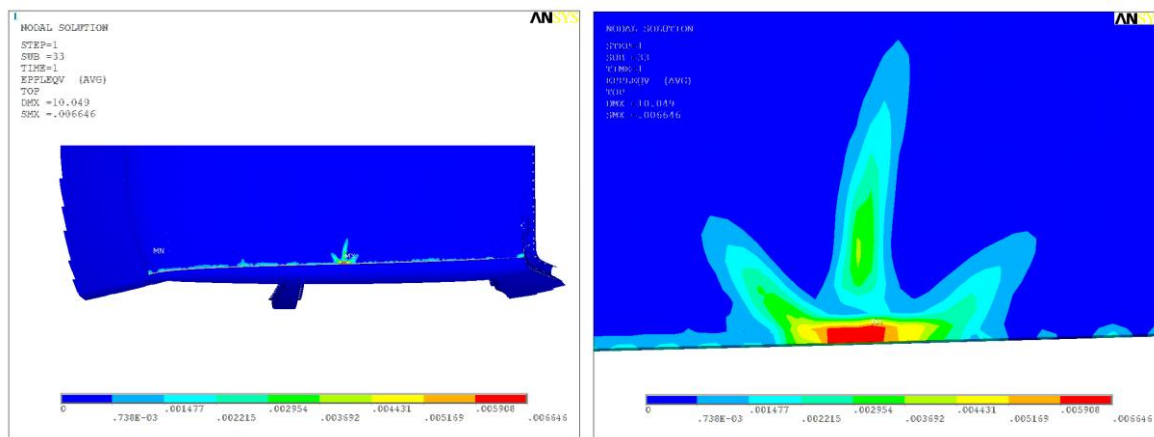
Obrázek 18 - Deformace v ose Z pro začátek propadu



Obrázek 19 - Deformace v ose Z na konci výpočtu



Z obrázku je patrné, že dochází k propadu na střeše mezi příčnicí. Hloubka tohoto propadu dosahuje hodnoty -2,457 mm. Při tomto propadu dochází také ke vzniku plastické deformace, která je vykreslena na následujícím obrázku (Obrázek 20) jak v celkovém pohledu na model, tak v detailu.



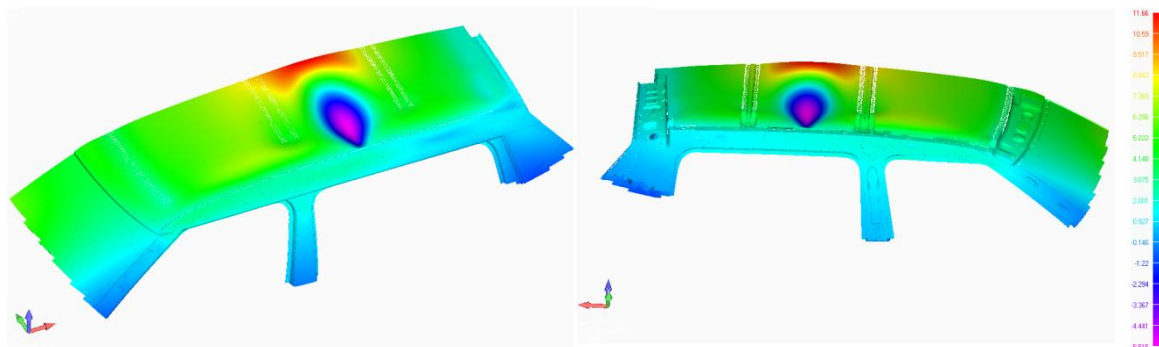
Obrázek 20 - Ekvivalentní plastická deformace

Maximální hodnota plastické deformace je 0.006646. Tato deformace vzniká v místě propadu u okraje střechy, kde je plech střechy spojen s postranicí laserovým svarem.

### 6.3 Srovnání výsledků lineárních výpočtů ANSYS – NASTRAN

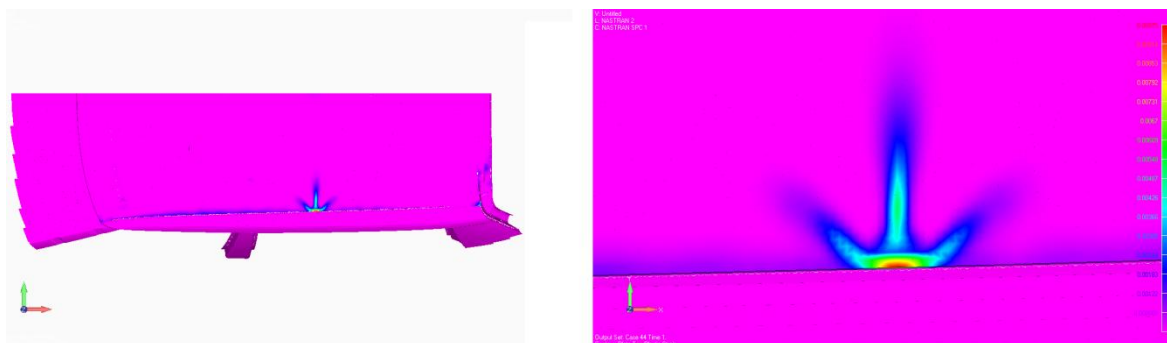
Při srovnání výsledků z obou programů je patrné, že k propadu dochází v přibližně stejném místě a propad má stejný tvar. Ovšem značný rozdíl je v maximální dosažené hloubce propadu. V ANSYSu byla vypočítaná deformace -2,457 mm a v programu NASTRAN pak -5,15 mm. Rozdíl mezi vypočtenými hodnotami propadu je tedy 2,693 mm, což ve srovnání s velikostí deformace není málo. Deformace v ose Z z programu NASTRAN je uvedena na obrázku níže (Obrázek 21). Dle výpočtů z NASTRANu začíná k propadu docházet při teplotě 150 °C a ve srovnání s ANSYSem jde tedy o rozdíl 33,8 °C. Rozdíl v hodnotách deformací i kritické teploty lze přisoudit laserovému svaru, který spojuje střechu s boční postranicí. V ANSYSu je tento svar modelován pomocí Beam

elementu a s modelem jsou spojeny pomocí kontaktních prvků CONTA a TARGET. Kdežto v NASTRANu jsou Beam prvky svarů spojeny elementy RBE3. Toto spojení má jiné vlastnosti než spojení modelované v ANSYSu a rozdíl ve výsledcích lze přisuzovat právě jemu.



Obrázek 21 - Deformace v ose Z - NASTRAN

Při srovnání hodnoty plastické deformace zjistíme, že v obou případech jde o velmi malé hodnoty. V ANSYSu vyšla plastická deformace o hodnotě 0,006646 a v NASTRANu 0,00975. Jejich rozdíl je tedy 0,003104.

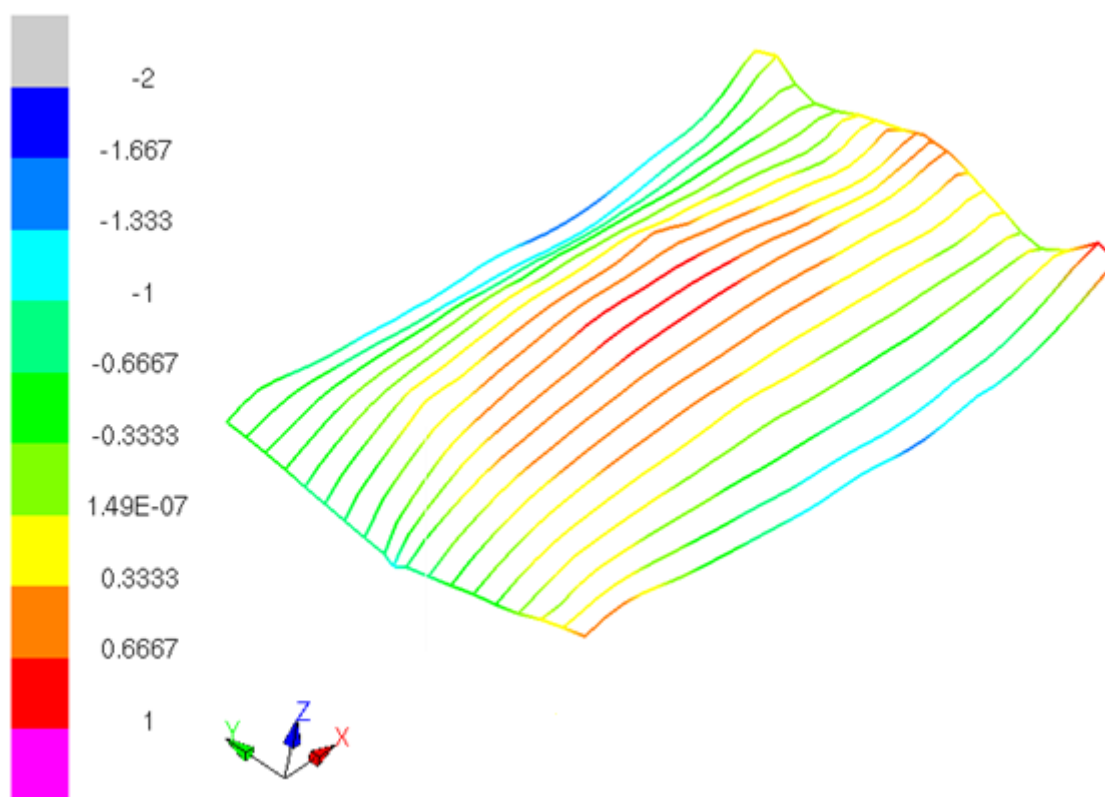


Obrázek 22 - Plastická deformace - NASTRAN

Hodnota plastické deformace pohybující se okolo hodnoty 0,01 není nijak významná. Ovšem i takto malá hodnota dokáže způsobit viditelnou deformaci, která je nepřijatelná.

## 7. Srovnání výsledků simulace s chováním reálného automobilu

Z výsledků simulace, která je popsána v minulé kapitole, vyplývá, že na střechě automobilu dochází k propadu v místě mezi příčnící. V místě se vyskytla plastická deformace, která způsobí, že po vychladnutí střechy v ní zůstane určitá odchylka od původního tvaru. Tyto odchylky byly zjištěny i na střechě skutečného automobilu, když opustil prostor sušící linky. Propady a boule se ovšem na skutečném automobilu vyskytovaly i na více místech. Tyto skutečnosti výpočet nepotvrdil. Je také nezbytné přihlídnout k tomu, že při výpočtových simulacích bylo počítáno s ideálním tvarem střechy. Ve skutečnosti je tento tvar odlišný, má různé nedokonalosti, které zcela jistě také ovlivňují vytváření propadů a jejich rozložení na střechě. Ve firmě ŠKODA AUTO a.s. bylo provedeno měření odchylek střechy od ideálního tvaru v ose Z. Z výsledků tohoto měření (Obrázek 23) je vidět, že tvar střechy dosahuje v určitých místech i milimetrové odchylky.



Obrázek 23 - Změřená odchylka v ose Z

Toto měření bylo provedeno v určité vývojové etapě automobilu a nejedná se samozřejmě o střechu vozu, který se dostal do prodeje. Při hledání důvodu vznikajících propadů v této vývojové fázi vozidla, by bylo určitě vhodné s těmito počátečními nerovnostmi počítat.

Cílem tohoto výpočtu bylo potvrdit, že ve struktuře střechy probíhají změny, které vedou k trvalým změnám tvaru střechy. Tyto změny potvrzeny byly.

## 8. Návrhy na zvýšení odolnosti střechy

Tato část diplomové práce se bude zabývat několika změnami v oblasti střechy tak, aby bylo dosaženo co největšího zvýšení odolnosti střechy proti teplotnímu zatížení. Cílem těchto změn tedy je, aby ke ztrátě stability v oblasti střechy došlo za co nejvyšších teplot. Při návrhu změn musí být brán ohled na to, že je potřeba dodržet skutečnost, aby nebyl nijak razantně měněn jak design automobilu, tak aby nebylo potřeba přistupovat ke změnám technologických parametrů.

U každého návrhu byl nejprve proveden lineární výpočet, který ukázal, zda je postupováno správným směrem a po tomto výpočtu následoval výpočet nelineární. U výpočtů byly zvýšeny teploty zatěžující strukturu, aby bylo možné pozorovat ztrátu stability i za vyšších teplot, než jen 220 °C. To bylo provedeno vynásobením všech teplot součinitelem 1,36 tak, aby maximální teplota byla na hodnotě 300 °C a původní teplota 110 °C byla zvětšena na 150 °C. Poměr mezi teplotami zůstal tedy nezměněn.

### 8.1 První návrh – střecha z plechu o větší tloušťce

Tento první návrh je vlastně nejjednodušší možnou variantou úpravy, která mohla být provedena. Ukázalo se, že jde o velmi efektivní a rychlou změnu, kterou se opravdu dospělo ke zvýšení odolnosti střechy. Negativní vlastností tohoto návrhu je, že tlustší plech přímo souvisí s vyšší hmotností automobilu a jeho výrobní cenou. Vyšší hmotnost střechy ovlivní těžiště automobilu, které se tak přesouvá směrem nahoru a to negativně ovlivní stabilitu vozu a jeho jízdní vlastnosti. Tloušťka plechu byla zvýšena jen o 0,25 mm z původní hodnoty 0,75 mm na 1 mm.

V původním MKP modelu byly provedeny dvě změny. První změnou bylo navýšení teplot, jak bylo popsáno výše. Druhou změnou bylo zvýšení tloušťky plechu střechy. Tato změna se provedla jednoduše změnou konstanty přiřazené prvkům tohoto plechu (Real konstanta). Konkrétně se jednalo o číslo konstantu 410100, jejíž jedinou

hodnotou je pro SHELL prvky právě tloušťka. Původní hodnota 0,75 byla tedy změněna na hodnotu 1. Počet elementů a počet stupňů volnosti se touto změnou od původního modelu nezměnil.

### 8.1.1 Lineární výpočet prvního návrhu

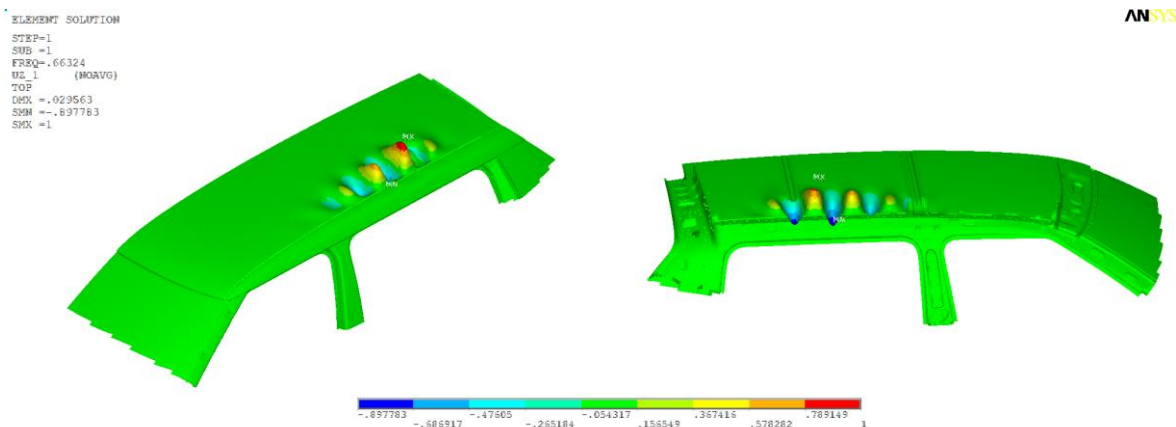
Lineární výpočet byl prováděn stejným postupem jako v kapitole 5.1, a proto zde detailní postup už nebude znovu popisován.

V následující tabulce (Tabulka 5) je uvedeno 5 prvních kritických součinitelů. Pro první kritický součinitel je dále vykreslený kritický tvar propadu (Obrázek 24). Tvar je opět normován na jedničku.

Kritický součinitel	
1.	0.66324
2.	0.66447
3.	0.70201
4.	0.70332
5.	0.74430

Tabulka 5 - Kritické součinitele 1. návrhu

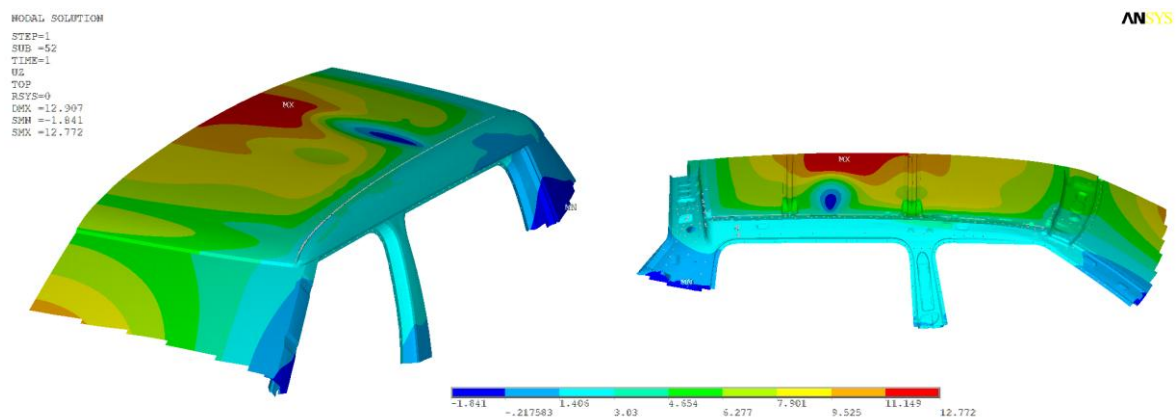
Při vykreslení obrázků deformace v ose Z (Obrázek 24) je vidět, že první kritický tvar je velmi podobný prvnímu kritickému tvaru na střeše bez provedené úpravy. Po vynásobení teploty prvním kritickým součinitelem ovšem zjistíme, že propad nastává až při teplotě  $T_{CL} = 300 \cdot 0.663 = 198,97 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a dojde tedy k navýšení kritické teploty o 61,1  $^{\circ}\text{C}$ .



Obrázek 24 - První kritický tvar 1. návrhu

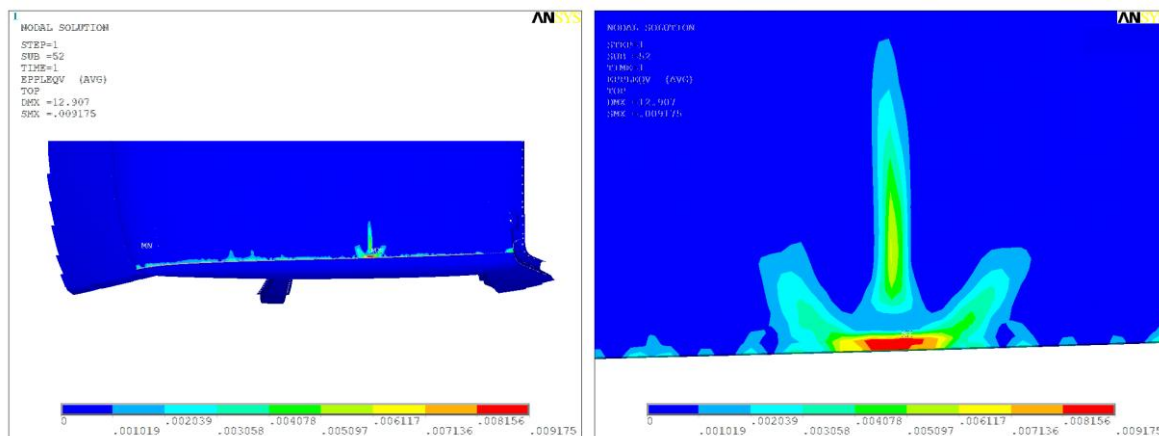
## 8.1.2 Nelineární výpočet prvního návrhu

Nelineární výpočet byl opět prováděn stejným způsobem jako v případě původního modelu. Tento výpočet popisuje kapitola 6.1.



Obrázek 25 – Deformace v ose Z na konci výpočtu

Z výsledků posunutí ve směru osy Z na konci výpočtu (Obrázek 25) vidíme, že charakteristický tvar propadu je podle očekávání téměř identický s původním modelem. K propadu střechy začíná docházet ve výpočtovém čase 0,953 a to odpovídá teplotě  $T_{CN} = 0,953 \cdot 300 = 286,9 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Ve srovnání s původním modelem bez úprav došlo k navýšení o 3,09  $^\circ\text{C}$ . Tato hodnota leží mimo teploty, kterými ji zatěžován model při průchodu lakovnou. Plastická deformace vznikající v oblasti střechy při teplotě 300  $^\circ\text{C}$  dosahuje hodnoty 0,0092.



Obrázek 26 - Ekvivalentní plastická deformace na konci výpočtu

### 8.2 Druhý návrh – tloušťka střechy zvýšena jen na okraji

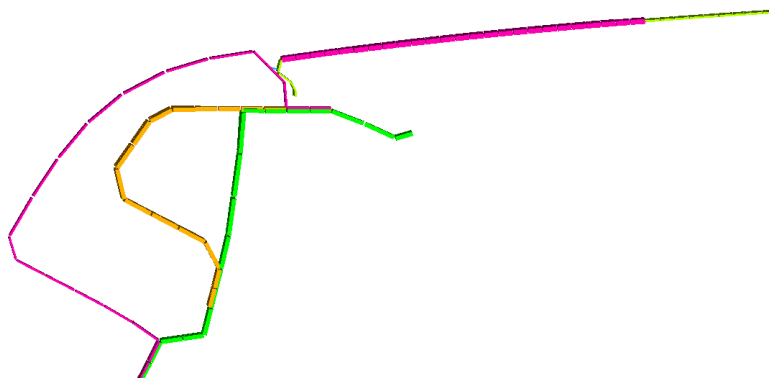
K tomuto návrhu bylo přistoupeno z důvodů negativních vlastností návrhu prvního. Těmi jsou vyšší hmotnost a výrobní cena. U výpočtu na původním modelu je vidět, že k propadu dochází na okraji střechy. Proto se jeví jako zbytečné vyrábět celou střechu z plechu o větší tloušťce.

Změna byla modelována tak, jako kdyby na původní plech střechy byl připevněn pás plechu o tloušťce 1 mm. Celková tloušťka v místě vyztužení je tedy 1,75 mm. Výztuha má šířku cca 110 mm. Počet stupňů volnosti a počet elementů modelu opět zůstal nezměněn.



ELEMENTS  
REAL NUM

ANSYS



Obrázek 27 - Druhý návrh

Původním návrhem tohoto typu bylo dát výztuhu jen do místa propadu mezi příčníky. Ovšem touto změnou došlo pouze k tomu, že se propad posunul více dozadu a odolnost střechy se nijak výrazně nezměnila.

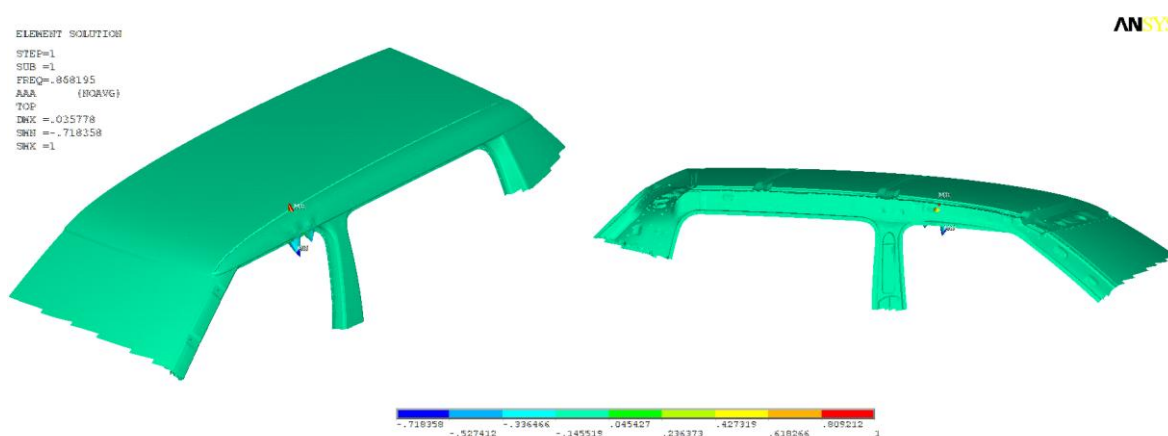
### 8.2.1 Lineární výpočet druhého návrhu

Z výsledků lineárního výpočtů druhého návrhu vidíme, že k propadu v oblasti střechy vůbec nedojde. Propad se přesunul ze střechy na boční postranici, která je vyrobena z plechu o tloušťce 0,75 mm, tedy stejného jako původní střecha. Kritická teplota lineárního výpočtu druhého návrhu dosahuje hodnoty  $T_{CL} = 300 \cdot 0.868 = 260,46^\circ\text{C}$ . V následující tabulce (Tabulka 6) je opět uvedeno 5 prvních kritických součinitelů a na obrázku pod tabulkou je vykreslen první kritický tvar (Obrázek 28).

Kritický součinitel	
1.	0.86819
2.	0.92150
3.	0.92231
4.	0.99103
5.	1.0254

Tabulka 6 - Kritické součinitele 2. návrhu

Touto úpravou tedy byla kritická teplota lineární ztráty stability navýšena o 122,56 °C ve srovnání s původním modelem.



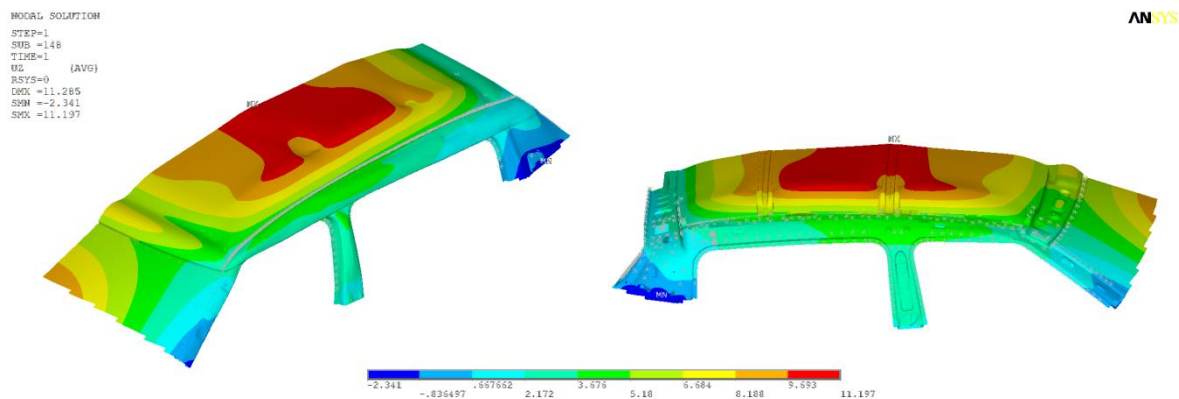
Obrázek 28 - První kritický tvar 2. návrhu

### 8.2.2 Nelineární výpočet druhého návrhu

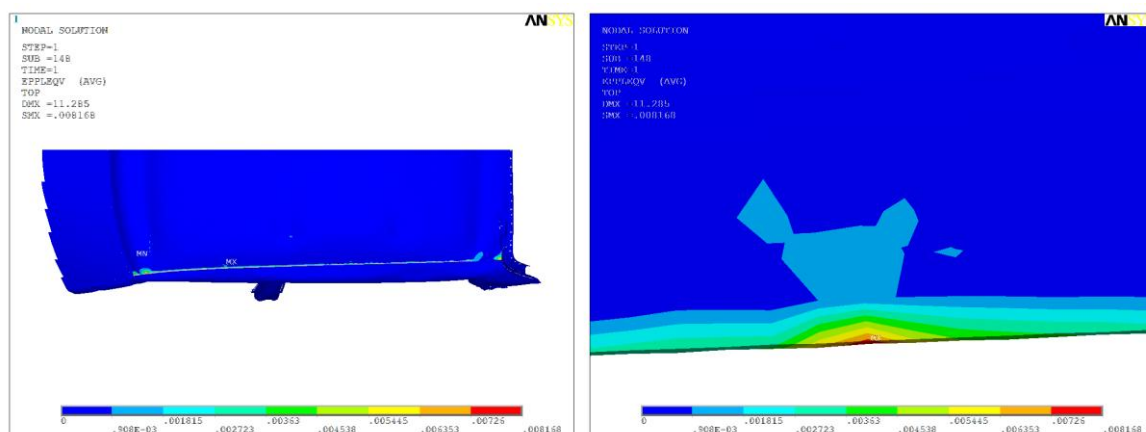
Výsledky nelineárního výpočtu potvrzují, že k propadu v oblasti střechy nedojde. Z obrázku deformované střechy na konci výpočtů (Obrázek 29) vidíme, že střecha se pouze „nafoukne“, ale k žádným neočekávaným změnám nedochází.

## Simulace propadů střechy automobilu a návrh změn vedoucích ke zvýšení odolnosti střechy

Plastická deformace, jejíž průběh na konci výpočtu je vykreslen na obrázku níže (Obrázek 30), dosahuje při teplotě 300 °C maximální hodnoty 0,0082. K tomuto maximu dochází na okraji střechy, kde vzniká určité pnutí díky svarovým spojmům.



Obrázek 29 - Deformace v ose Z na konci výpočtu

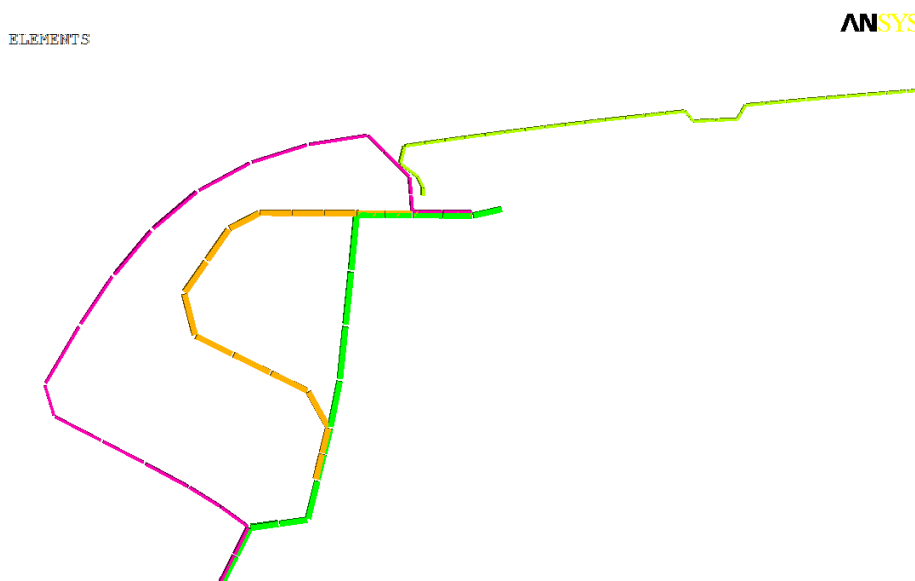


Obrázek 30 - Ekvivalentní plastická deformace na konci výpočtu

### 8.3 Třetí návrh – prolis v plechu

Prolisy plechů značně ovlivňují jejich pevnost a tuhost a na automobilech jsou často zastoupeným konstrukčním prvkem. Prolisem se zvyšuje odolnost proti nechtěnému promáčknutí, nebo se jím zabraňuje, aby plech při chvění vydával nežádoucí hluk. Proto byl realizován návrh, kde byl vytvořen jednoduchý prolis po délce střechy.

Následující obrázek (Obrázek 31) zobrazuje vytvořený návrh. Prolis je vymodelován téměř přes celou délku střechy. Má hloubku 3,5 mm, šířka v horní části je 15 mm a ve spodní části 11 mm. Umístění bylo navrženo s ohledem na výpočet z původního modelu, tak aby prolis byl v místě vznikající největší boule u lineárního výpočtu. Hrana prolisu je vzdálena 700 mm od okraje plechu střechy. Počet elementů tvořící model je 77308 a počet stupňů volnosti modelu pro třetí návrh je 312889.



Obrázek 31 - Třetí návrh - prolis v plechu

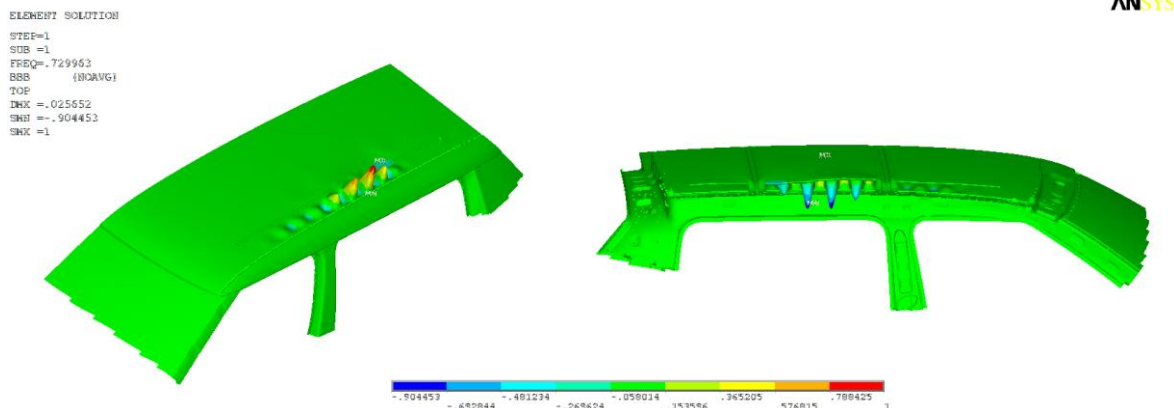
### 8.3.1 Lineární výpočet třetího návrhu

Z výsledků lineárního výpočtu pro třetí návrh je patrné, že propad nastal v přibližně stejném místě jako na střeše bez úprav (Obrázek 32), ovšem zvýšila se kritická teplota propadu a to na hodnotu  $T_{CL} = 0.73 \cdot 300 = 219 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Kritický součinitel	
1.	0.72996
2.	0.73441
3.	0.73587
4.	0.73862
5.	0.74581

Tabulka 7 - Kritické součinitele 3. návrhu

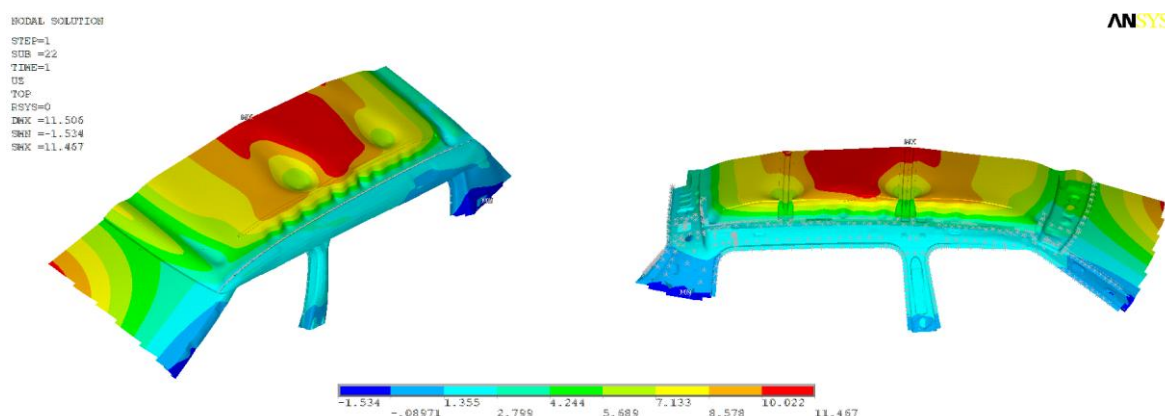
Prolis vytvořený v plechu střechy tedy zvýšil její odolnost proti elastické ztrátě stability o 81,1  $^{\circ}\text{C}$  oproti původnímu modelu.



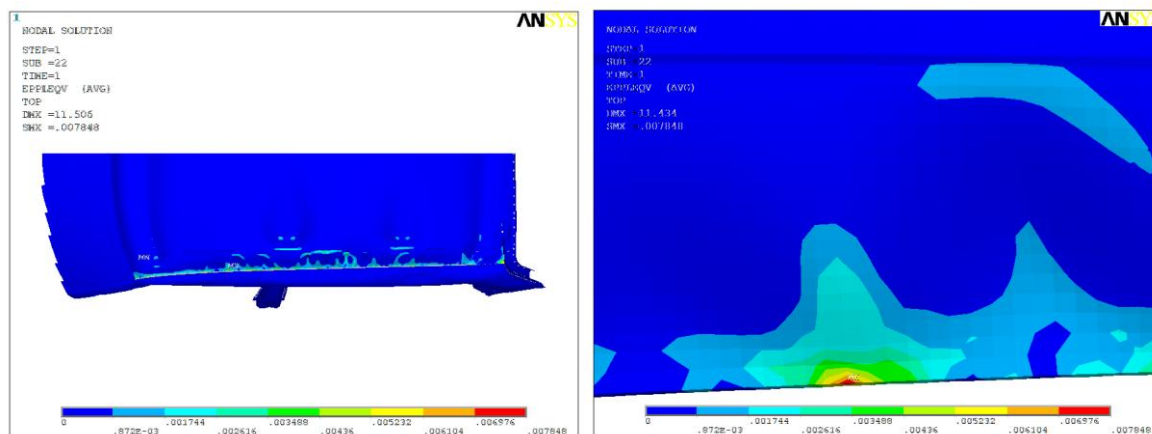
Obrázek 32 - První kritický tvar 3. návrhu

## 8.3.2 Nelineární výpočet třetího návrhu

Výsledky nelineárního výpočtů potvrdily, že prolis v plechu zabránil vzniku původního propadu, takže svojí funkci splnil velmi dobře. Střecha se s narůstající teplotou pouze „nafukuje“, ale k žádným propadům nedochází (Obrázek 33). Při vykreslení plastických deformací (Obrázek 34) vidíme, že maximální dosažená hodnota je 0,0078, což je hodnota srovnatelná s výsledkem původní struktury. Ovšem zde je této hodnoty dosaženo až při teplotě 300 °C.



Obrázek 33 - Deformace v ose Z na konci výpočtu

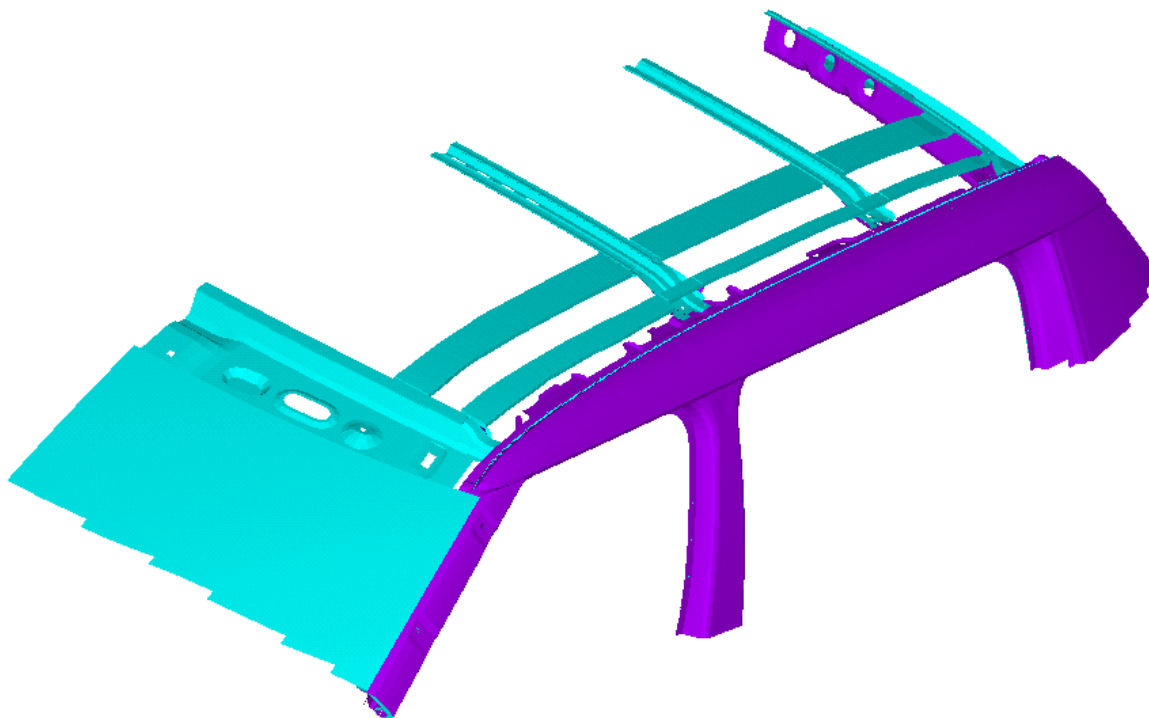


Obrázek 34 – Ekvivalentní plastická deformace na konci výpočtu

## 8.4 Čtvrtý návrh – výztuhy pod střechou

Při vymýšlení tohoto návrhu bylo předpokládáno, že podepřením místa, kde se střecha propadá, dojde ke zvýšení odolnosti. Struktura střechy se, ale chová velmi nevyzpytatelně a najít tak správné umístění výztuhy nebylo jednoduché. Výpočty bylo zjištěno, že jen jedna výztuha nezabrání tomu, aby k propadu došlo. Pokud byla umístěna jediná výztuha do místa původního propadu, propad se přemístil hned za tuto výztuhu a kritická teplota se nijak nenavýšila. Proto byly umístěny 2 výztuhy vedle sebe. Tím se odstranil propad z místa mezi příčníky, ale po této úpravě propad nastal za druhým příčníkem a kritická teplota byla zvýšena jen minimálně. Proto byly postupně umisťování další výztuhy do míst nových propadů, dokud nebyla kritická teplota dostatečně navýšena. Tvar výztuh je kvůli ohybové tuhosti jednoduchý profil U.

Nejprve byly modelovány obě výztuhy se stejnými rozměry. To se, ale ukázalo také jako nevyhovující. K propadu došlo opět hned za výztuhou. Proto byla druhá výztuha vymodelována širší, což už vedlo ke zlepšení. Prostor mezi výztuhou a střechou byl vyplněn lepidlem, které bylo modelováno solid elementy, stejně jako lepidlo mezi příčníky a střechou. Toto lepidlo bylo se střechou a výztuhou spojeno kontaktem, který zaručuje neustálé spojení součástí (Bonded always).



Obrázek 35 - Čtvrtý návrh - výztuhy

Touto změnou došlo k navýšení kritické teploty. Ovšem neukázala se být efektivním způsobem. Hledání místa pro umístění výztuh je velmi zdlouhavé a dokonce se ukázalo, že v některých případech přidáním další výztuhy kritická teplota dokonce klesne. Výztuhy by určitě byly efektivnější na menší ploše, než je právě střecha automobilu.

Počet elementů modelu je 144606 a počet stupňů volnosti modelu pro čtvrtý návrh je 321232.

#### 8.4.1 Lineární výpočet čtvrtého návrhu

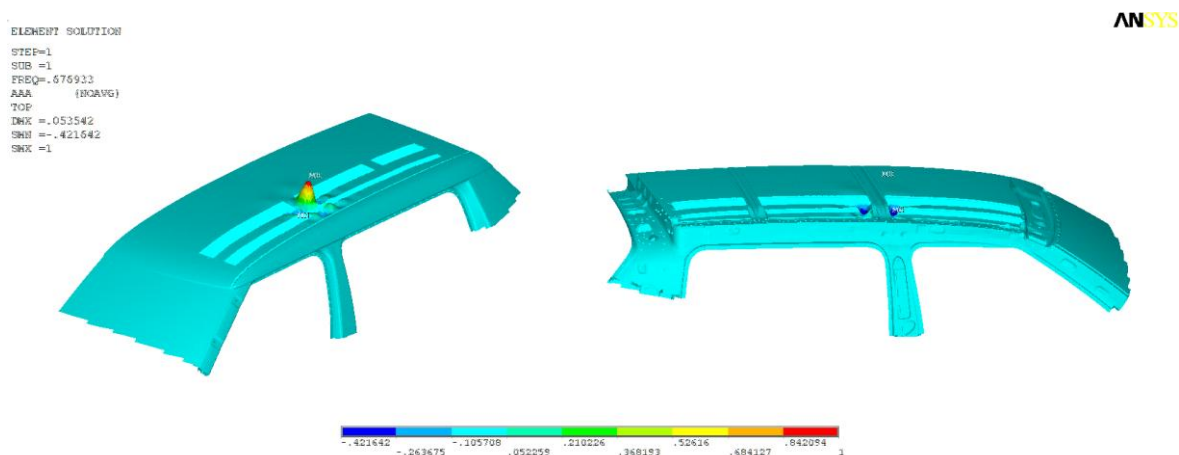
Dle obrázku s vykreslením deformace v ose Z (Obrázek 36) je vidět, že k propadu došlo v oblasti prvního příčnicku, kde není střecha přilepena lepidlem (lepidlo je pouze na krajích příčnicku a uprostřed ne). Přilepení střechy k příčnicku tedy zabraňuje vyboulení nebo propadu střechy v lineární oblasti velmi dobře. Z prvního kritického součinitele v následující tabulce (Tabulka 8) zjistíme, že k propadu dle lineárního výpočtu dojde při



teplotě  $T_{CL} = 0,677 \cdot 300 = 203,1 \text{ } ^\circ\text{C}$  a došlo tedy k navýšení o  $65,2 \text{ } ^\circ\text{C}$  oproti lineárnímu výpočtu původního modelu.

Kritický součinitel	
1.	0.67693
2.	0.70968
3.	0.71408
4.	0.73408
5.	0.73608

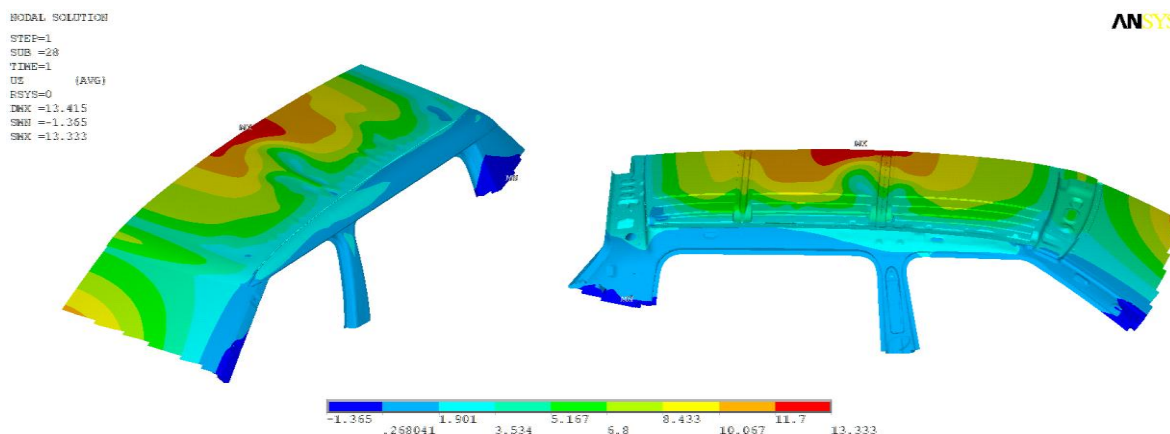
Tabulka 8 - Kritické součinitele 4. návrhu



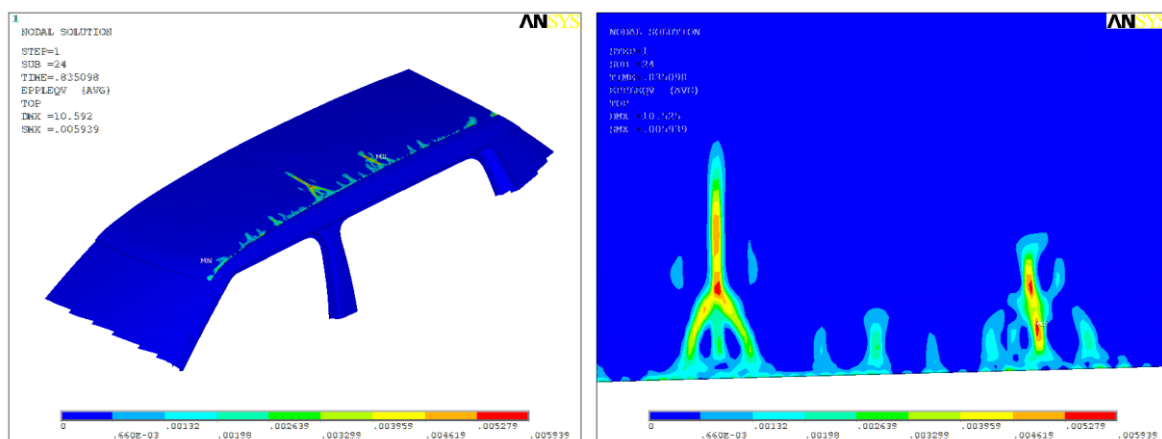
Obrázek 36 - První kritický tvar 4. návrhu

## 8.4.2 Nelineární výpočet čtvrtého návrhu

Nelineární výpočet opět nepotvrdil, že by v oblasti střechy mělo dojít k propadu (Obrázek 37), takže výztuhy plní svojí úlohu dobře. V určitých oblastech střechy vznikly plastické deformace (Obrázek 38), ty ale dosahují jen hodnoty 0,005 a to až při teplotě  $300 \text{ } ^\circ\text{C}$ , takže daleko za hodnotou, kterou je střecha v lakovně namáhána.



Obrázek 37 - Deformace v ose Z na konci výpočtu



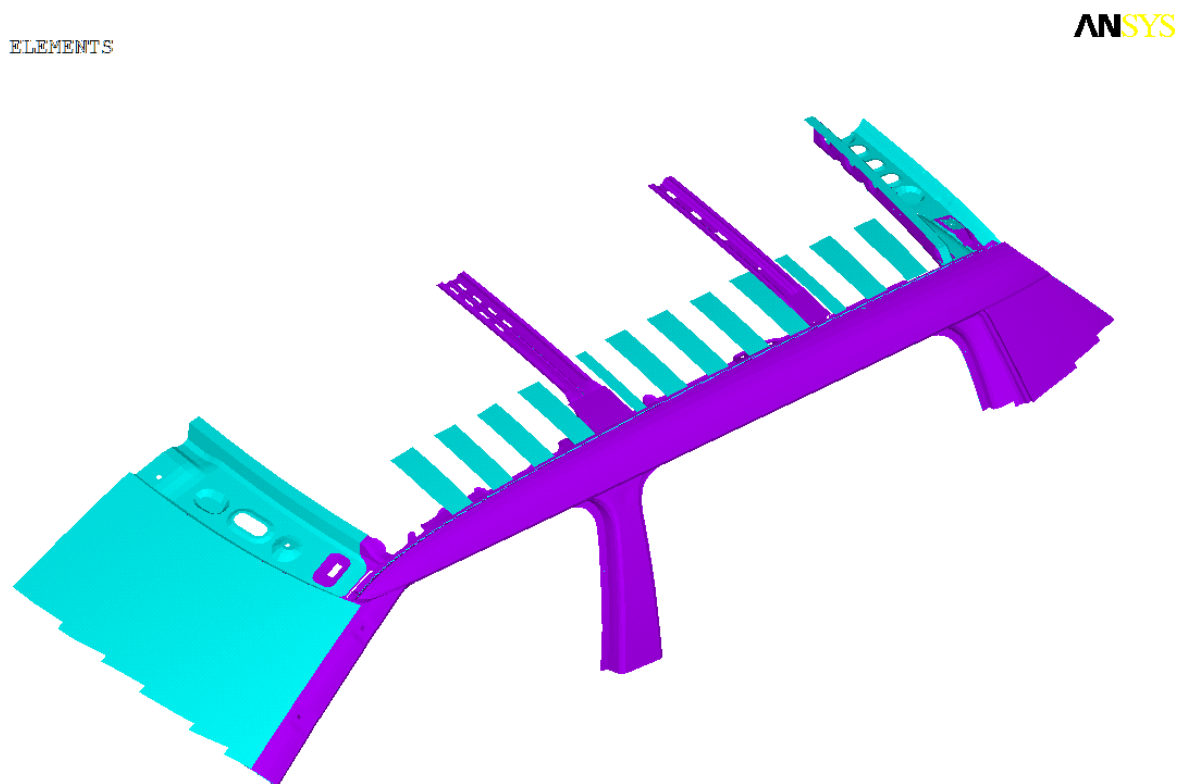
Obrázek 38 – Ekvivalentní plastická deformace na konci výpočtu

### 8.5 Pátý návrh – přilepené pásy plechu

Základní myšlenkou tohoto návrhu bylo, že pokud na strukturu bude v kritických místech přilepena pomocná výztuha, tak pomůže k přenosu vznikajícího napětí dál do struktury a přispěje tak rovnoměrnějšímu průběhu napětí v místech, kde bude umístěna. Tím by mělo dojít k odstranění propadu, nebo alespoň k tomu, aby se začal tvořit za vyšších teplot.

Pomocné výztuhy tvořily jednoduché pásy plechu, které byly na strukturu přilepené stejným lepidlem, jakým je přilepena střecha k příčnícím. Plech, ze kterého jsou

pásky tvořeny, má tloušťku 2 mm. Pásky mají šířku 50 mm a mezera mezi nimi je také 50 mm. Jen u 2 pásků u příčnicku byla šířka snížena. Spojení lepidla se střechou a páskem plechu bylo provedeno opět kontaktem zajišťující neustálé spojení (Bonded always). Takto upravený model obsahuje 143521 elementů a má 319741 stupňů volnosti. Vykreslený model s provedenou úpravou a odebraným plechem střechy je vykreslen na následujícím obrázku (Obrázek 39).



Obrázek 39 - Pátý návrh

### 8.5.1 Lineární výpočet pátého návrhu

Z obrázku deformace v ose Z (Obrázek 40) lze vidět, že propad nastává zhruba na stejném místě jako v případě původního modelu. Boule propadu jsou, ale protáhlé ve směru pásků plechu. Kritické součinitele jsou vypsány v následující tabulce.

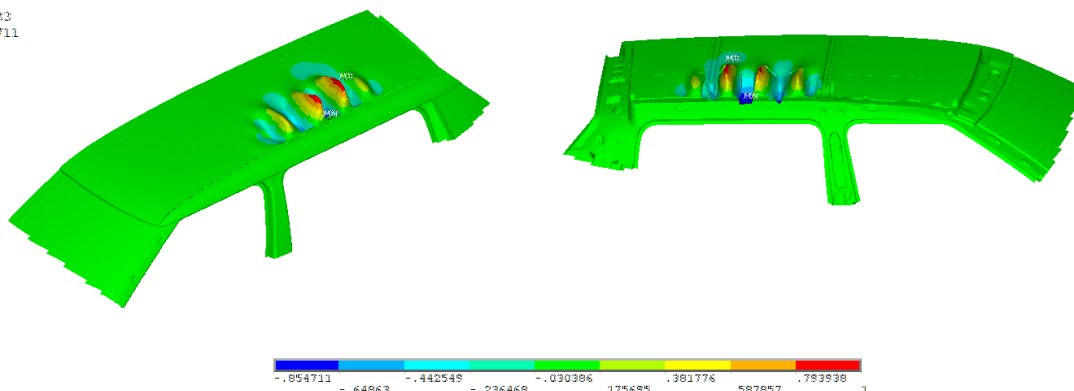
Kritický součinitel	
1.	0.61300
2.	0.61655
3.	0.63718
4.	0.63991
5.	0.65890

Tabulka 9 - Kritické součinitele 5. návrhu

Z prvního součinitele můžeme dopočítat kritickou teplotu, která má hodnotu  $T_{CL} = 0,613 \cdot 300 = 183,9 \text{ } ^\circ\text{C}$  a došlo tedy k navýšení o  $46 \text{ } ^\circ\text{C}$  oproti lineárnímu výpočtu původní struktury.

ELEMENT SOLUTION  
STEP=1  
SUB =1  
FREQ=-.593583  
CCC {NOAVG}  
TOP  
DNK =.025933  
SMN =-.854711  
SMX =1

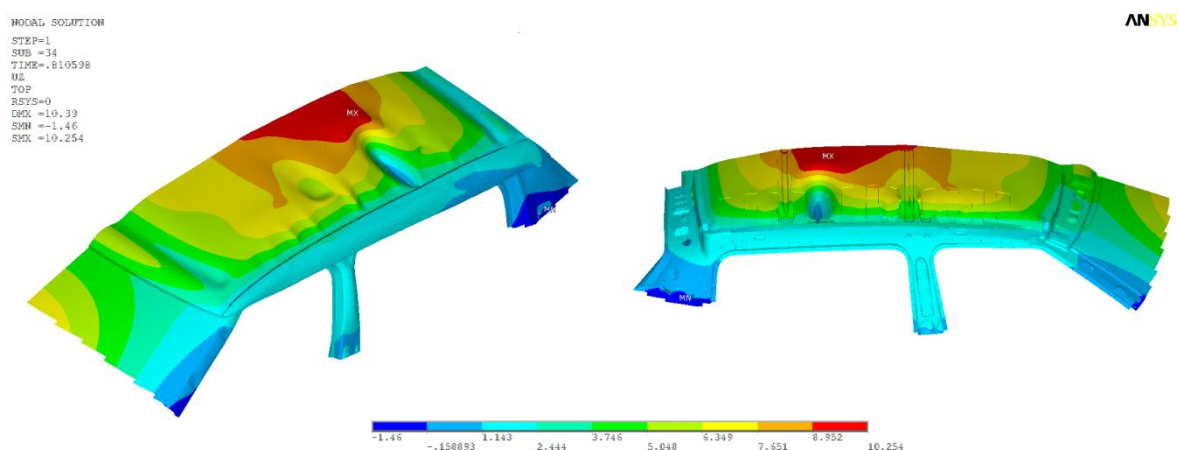
ANSYS



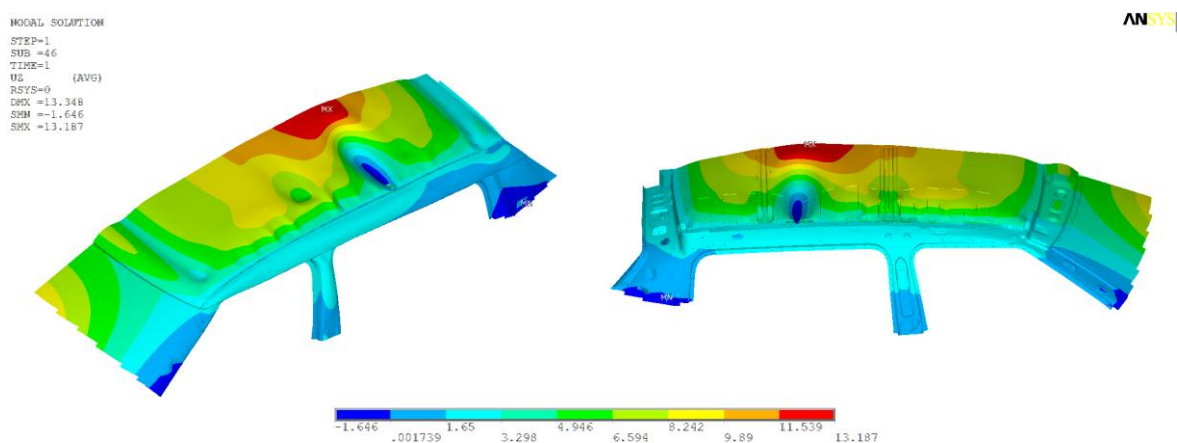
Obrázek 40 - První kritický tvar 5. návrhu

## 8.5.2 Nelineární výpočet pátého návrhu

Výsledky nelineárního výpočtu ukázaly, že dojde ke stejnému propadu, jako v případě původní střechy (Obrázek 42). Díky přilepeným páskům plechu dojde k tomuto propadu za vyšších teplot. Propad se začíná tvořit v časovém kroku 0,81 (Obrázek 41) a to odpovídá teplotě  $T_{CN} = 0,81 \cdot 300 = 243,18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Došlo tedy k navýšení kritické teploty o  $59,37 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .



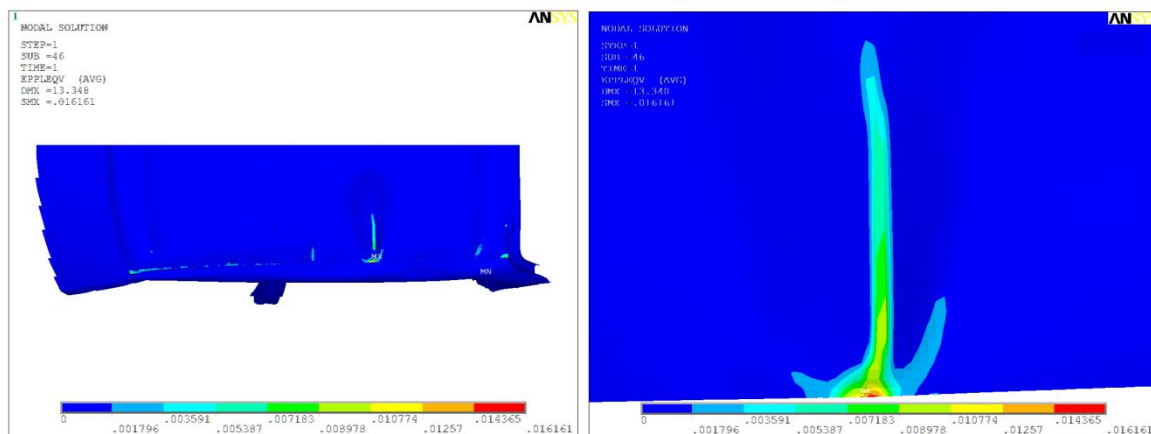
Obrázek 41 - Deformace v ose Z na začátku propadu



Obrázek 42 - Deformace v ose Z na konci výpočtu

Plastická deformace dle následujícího obrázku dosahuje maximální hodnoty 0,0107 a jde tedy o vyšší hodnotu než na původní struktuře. Ovšem opět až za teploty  $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## Simulace propadů střechy automobilu a návrh změn vedoucích ke zvýšení odolnosti střechy



Obrázek 43 - Ekvivalentní plastická deformace na konci výpočtu

## 8.6 Zhodnocení návrhů

Všechny návrhy splnily svůj účel a zvýšily kritickou teplotu ztráty stability jak v elastické oblasti, tak v oblasti nelineární. V následující tabulce (Tabulka 10) jsou vypsány teploty ztráty stability pro lineární i nelineární výpočet provedených návrhů včetně přírůstku kritické teploty ve srovnání s původním modelem.

Č. návrhu	Lineární výpočet [°C]	Nelineární výpočet [°C]
1	198,97 (+61,07)	286,9 (+103,1)
2	260,46 (+122,56)	-
3	219 (81,1)	-
4	203,1 (65,2)	-
5	183,9 (+46)	243,18 (+59,37)

Tabulka 10 - Tabulka kritických teplot jednotlivých návrhů

U některých návrhů pro nelineární výpočet ke ztrátě stability vůbec nedošlo. To je způsobeno nelineárním chováním materiálu, kdy už křivka Napětí – Deformace nemá sklon Youngova modulu pružnosti, ale je zadána novou hodnotou tangenciálního modulu pružnosti podle typu materiálu. Pokud se plastický kloub nevytváří v jednom místě, může se konstrukce při přechodu z elastické do plastické oblasti stát i odolnější a proto k propadům nedojde.

Jako nejnepříjemnější návrh se jeví návrh č. 5, který je i konstrukčně velmi jednoduchý a dá se aplikovat na stávající automobil, bez jakýchkoliv jiných zásahů. Tento návrh sice dosáhl nejnižších kritických teplot, ale i ty jsou nad hranicí teplot, kterými je automobil v sušící lince zatěžován. Nejvyššího nárůstu kritických teplot bylo dosaženo u návrhu č. 2, kde k propadu v nelineární oblasti vůbec nedošlo a v lineární oblasti došlo k velmi výraznému navýšení kritické teploty.

## 9. Závěr

Cílem diplomové práce bylo numerické řešení ztráty stability tvaru na střeše automobilu Škoda Fabia II, ke kterému došlo při vysoušení nátěrů po průchodu lakovnou. Řešení bylo prováděno jak lineárním způsobem, kde je počítáno jen s elastickým chováním materiálu, tak také nelineárním způsobem, který zahrnuje také nelineární vlastnosti.

Veškeré výpočty v diplomové práci byly prováděny ve výpočtovém programu ANSYS ve verzi 12.1. Původní model pocházející z firmy ŠKODA AUTO a.s., jakožto zadavatele tématu diplomové práce, byl vytvořen v softwaru NASTRAN. Než mohlo tedy být přistoupeno k samotným výpočtům, muselo být provedeno importování modelu do ANSYSu. To v konečném důsledku vedlo k řešení mnoha problémů a těžkostí. K těmto problémům vedlo hlavně to, že NASTRAN používá k modelování určitý typ elementů, které ANSYS vůbec nerozpozná, takže model byl po importu bez jakéhokoliv svarového spojení. Tento problém byl vyřešen naprogramováním makra, které automaticky vytvořilo několik stovek svarů ze souřadnic poskytnuté zadavatelem. Svarové spojení vytvořené v ANSYSu, ale využívá jiný druh spojení s okolní strukturou, než v programu NASTRAN. Tento rozdíl se projevil ve výsledcích výpočtů a to hlavně u nelineárního výpočtu.

Po vyřešení problémů s importem a odladění výpočtů mohlo být přistoupeno modelování návrhů na střeše automobilu, které vedly k odstranění problému, nebo alespoň navýšení kritické teploty, která ztrátu stability způsobovala. Všechny provedené návrhy ke zlepšení problému v konečném stavu vedly. Ovšem některé byly více pracné, některé méně a ne všechny by nejspíš mohly být na skutečném automobilu provedeny. Provedené výpočty spíše jen poukazují na to, jakou cestou se lze vydat, pokud by k podobnému problému na vyráběném automobilu opět došlo. Kromě jediného návrhu žádný nijak citelně nemění design automobilu a jde tedy o úpravy, které nejsou na konečném automobilu vůbec vidět, což bylo i určitým kritériem při jejich vytváření.

Z konečného hlediska se tedy dá říci, že největším problémem bylo připravit model k výpočtu v programu ANSYS. Tato fáze zabrala při řešení práce nejvíce času, ale nedá se říci, že by byla zbytečná a že lituji toho, že jsem diplomovou práci neřešil rovnou v programu NASTRAN a tím bych se těmto problémům vyhnul. V této fázi jsem získal důležité zkušenosti jak od vedoucího mé diplomové práce, se kterým jsme strávili dlouhé hodiny při



vymýšlení různých postupů na odstranění problémů, tak při konzultacích v brněnské firmě, kde mi velmi pomohli a také u spousty jiných lidí z naší fakulty.

Bohužel nedošlo k moc dobré shodě ve výsledcích z obou programů a to hlavně u nelineárního výpočtu. Model v ANSYSu má jiné chování, než model v NASTRANu. Lepší shody by se mělo docílit změnou typu svázání svarových elementů s okolními částmi modelu. To, ale nebylo bohužel z časových důvodů provedeno.

## 10. Použitá literatura

- [1] Schwarz Jan, Automobily Škoda Fabia II (konstrukce – technika – údržba), Praha 7: Grada Publishing, a.s., 2008, 346 s.
- [2] Z. Bittnar – J. Šejnoha, Numerické metody mechaniky 1, Praha 6: Vydavatelství ČVUT, 1992, 309 s.
- [3] Z. Bittnar – J. Šejnoha, Numerické metody mechaniky 1, Praha 6: Vydavatelství ČVUT, 1992, 261 s.
- [4] Jiří Šjenoha, Jitka Bittnarová, Stabilita skořepin, Praha 6: Vydavatelství ČVUT, 1999, 45 s.
- [5] Vladimír Kolář, Ivan Němec, Viktor Kanický, FEM – principy a praxe metody konečných prvků, Praha 4: Computer Press, 1997, 401 s.
- [6] ANSYS® ANSYS Academic Research, Release 12.0, Help Systém
- [7] Škoda Auto Česká republika – Škoda Fabia – obrázky [online]. [citováno 4. května 2010]. Dostupné z: <[http://new.skoda-auto.com/SiteCollectionImages/model/Fabia\\_FL/hatchback/gallery/\\_780x585/13.jpg](http://new.skoda-auto.com/SiteCollectionImages/model/Fabia_FL/hatchback/gallery/_780x585/13.jpg)>

## Přílohy

### Příloha A

!makro pro tvorbu svaru dvoubodoveho svaru

\*ASK,IMAX,Zadej pocet radku,

!\*ASK,JMAX,Zadej pocet sloupce,

\*DIM,SVARY,ARRAY,IMAX,7

\*VREAD,SVARY(1,1),dva\_body,vip,,JIK,7,IMAX,,  
(10x,F6.0,5X,F3.1,1X,F7.2,1X,F7.2,1X,F7.2,2x,F6.0,1X,F7.0)

\*ASK,PocetDvojicPlechu,Zadej Pocet dvojic PLECHU,1  
/PREP7

\*DO,L,1,PocetDvojicPlechu

    \*ASK,N1,Zadej REAL PRVEHO PLECHU,2

    \*ASK,N2,Zadej REAL DRUHEHO PLECHU,3

    ESEL,S,REAL,,N1

    NSLE,R

    CM,UZLY%N1%,NODE

    CMSEL,A,UZLY%N1%

    ALLSEL

    ESEL,S,REAL,,N2

    NSLE,R

    CM,UZLY%N2%,NODE

    CMSEL,A,UZLY%N2%

    ALLSEL

    \*DO,K,1,IMAX

        \*IF,SVARY(K,6),EQ,N1,AND,SVARY(K,7),EQ,N2,THEN

            N,SVARY(K,1)+2\*%N1%,SVARY(K,3),SVARY(K,4),SVARY(K,5)

            !\*SET,PRVNI,SVARY(K,2)+33

        SWGEN,prvnisvar%K%,SVARY(K,2),UZLY%N2%,UZLY%N1%,SVARY(K,1)+2\*%N1%,0

        \*ELSEIF,SVARY(K,6),EQ,N2,AND,SVARY(K,7),EQ,N1,THEN

            N,SVARY(K,1)+3\*%N2%,SVARY(K,3),SVARY(K,4),SVARY(K,5)

            !\*SET,DRUHY,SVARY(K,1)+3\*%K%

        SWGEN,druhysvar%K%,SVARY(K,2),UZLY%N1%,UZLY%N2%,SVARY(K,1)+3\*%N2%,0

    \*ENDIF

    \*ENDDO

\*ENDDO

## Příloha B

!makro pro tvorbu tribodoveho svaru

\*ASK,IMAX,Zadej pocet radku,

!\*ASK,IMAX,Zadej pocet sloupce,

\*DIM,SVARY,ARRAY,IMAX,8

\*VREAD,SVARY(1,1),tri\_body,vip,,JIK,8,IMAX,,  
(10x,F6.0,5X,F3.1,1X,F7.2,1X,F7.2,1X,F7.2,2x,F6.0,2X,F6.0,2x,F6.0)

\*ASK,PocetDvojicPlechu,Zadej Pocet dvojic PLECHU,1  
/PREP7

\*DO,L,1,PocetDvojicPlechu

\*ASK,N1,Zadej REAL PRVEHO PLECHU,1  
\*ASK,N2,Zadej REAL DRUHEHO PLECHU,2  
\*ASK,N3,Zadej REAL TRETIHO PLECHU,3  
ESEL,S,REAL,,N1  
NSLE,R  
CM,UZLY%N1%,NODE  
CMSEL,A,UZLY%N1%  
ALLSEL

ESEL,S,REAL,,N2  
NSLE,R  
CM,UZLY%N2%,NODE  
CMSEL,A,UZLY%N2%  
ALLSEL

ESEL,S,REAL,,N3  
NSLE,R  
CM,UZLY%N3%,NODE  
CMSEL,A,UZLY%N3%  
ALLSEL

\*DO,K,1,IMAX  
    \*IF,SVARY(K,6),EQ,N1,AND,SVARY(K,7),EQ,N2,THEN  
        \*IF,SVARY(K,8),EQ,N3,THEN  
            N,SVARY(K,1)+5\*%N1%,SVARY(K,3),SVARY(K,4),SVARY(K,5)  
            !\*SET,PRVNI,SVARY(K,2)+33  
SWGEN,svar\_%SVARY(K,1)%,SVARY(K,2),UZLY%N2%,UZLY%N1%,SVARY(K,1)+5\*%N1%,0  
    SWADD,svar\_%SVARY(K,1)%,,UZLY%N3%  
    \*ENDIF

\*ELSEIF,SVARY(K,6),EQ,N2,AND,SVARY(K,7),EQ,N3,THEN  
    \*IF,SVARY(K,8),EQ,N1,THEN  
        N,SVARY(K,1)+6\*%N2%,SVARY(K,3),SVARY(K,4),SVARY(K,5)  
        !\*SET,DRUHY,SVARY(K,1)+3\*%K%  
SWGEN,svar\_%SVARY(K,1)%,SVARY(K,2),UZLY%N1%,UZLY%N2%,SVARY(K,1)+6\*%N2%,0  
    SWADD,svar\_%SVARY(K,1)%,,UZLY%N3%  
    \*ENDIF

\*ELSEIF,SVARY(K,6),EQ,N3,AND,SVARY(K,7),EQ,N1,THEN  
    \*IF,SVARY(K,8),EQ,N2,THEN

## Simulace propadů střechy automobilu a návrh změn vedoucích ke zvýšení odolnosti střechy

---

```
N,SVARY(K,1)+7*%N2%,SVARY(K,3),SVARY(K,4),SVARY(K,5)
!*SET,TRETI,SVARY(K,1)+3*%K%

SWGEN,svar_%SVARY(K,1)%,SVARY(K,2),UZLY%N1%,UZLY%N2%,SVARY(K,1)+7*%N2%,0
SWADD,svar_%SVARY(K,1)%,,UZLY%N3%
*ENDIF
*ENDIF
*ENDDO
*ENDDO
```

## Příloha C

Průběh nelineárního výpočtu

\*\*\*\*\* INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE \*\*\*\*\*

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	0.10000	1	2	5
2	0.20000	1	4	12
3	0.30000	1	6	20
4	0.40000	1	8	28
5	0.47250	1	10	58
6	0.52875	1	12	67
7	0.62875	1	14	78
8	0.72875	1	16	87
9	0.76375	1	18	109
10	0.77084	1	20	141
11	0.77970	1	22	153
12	0.79963	1	24	165
13	0.83551	1	26	179
14	0.86242	1	28	201
15	0.91288	1	30	209
16	0.97343	1	32	221
17	1.0000	1	33	225